

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»

УДК 621.314.222.8

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

**на тему: «Вплив магнітного розсіювання на характеристики
високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-81мп

Бакало Вячеслав Русланович _____

Керівник:

Професор кафедри теоретичної електротехніки,

д.т.н, професор, Бржезицький В. О. _____

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О. _____

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ініціали _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (спеціалізація «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М. Я. Островерхов

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Бакало Вячеславу Руслановичу

1. Тема дисертації «Вплив магнітного розсіювання на характеристики високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги», науковий керівник дисертації Бржезицький Володимир Олександрович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «15» листопада 2019 р. №3923-с
2. Термін подання студентом дисертації 16.12.2019 р.
3. Об'єкт дослідження: магнітне розсіювання високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги.
4. Вихідні дані: частота – 50 Гц; діапазон робочих напруг від 10 В до 56250 В; вид ізоляції – епоксидний компаунд з відносною діелектричною проникністю 3,5; діаметри проводів – 0,14...0,67 мм; переріз стрижня магнітопроводу – 2824,65 мм².
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд основних вимог та теорій розрахунку трансформаторів напруги; розробка фізико-математичної моделі високовольтного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання; розрахунок вхідних параметрів фізико-математичної моделі високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання; результати розрахунку фізико-математичної моделі

високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання; стартап-проект; висновки по дисертації.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: вісесиметрична модель активної частини незаземлюваного трансформатора напруги; моделі незаземлюваного трансформатора напруги “середня точка первинної обмотки – екран” для фазного та лінійного режимів роботи; залежності похибки визначення коефіцієнту масштабного перетворення та кутової похибки від відносного значення напруги вторинної обмотки.

7. Дата видачі завдання 28.10.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд основних вимог та теорій розрахунку трансформаторів напруги	28.10.2019 – 5.11.2019	Виконав
2.	Розробка фізико-математичної моделі високовольтного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання	7.11.2019 – 15.11.2019	Виконав
3.	Розрахунок вхідних параметрів фізико-математичної моделі високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання	17.11.2019 – 25.11.2019	Виконав
4.	Результати розрахунку фізико-математичної моделі високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання	27.11.2019 – 5.12.2019	Виконав
5.	Стартап-проект	5.12.2019 – 10.12.2019	Виконав
6.	Висновки по дисертації	11.12.2019 – 12.12.2019	Виконав

Студент

В. Р. Бакало

Науковий керівник дисертації

В. О. Бржезицький

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Внаслідок постійних підвищень вимог до систем та установок вимірювання та обліку електричної енергії, виникає задача підвищення точності електричних вимірювань.

Розповсюдженим методом вимірювання високої напруги є вимірювання за допомогою трансформаторів напруги, на клас точності якого впливають складні процеси, що відбуваються в його активній частині.

Магнітне розсіювання є одним з таких процесів, тому його розрахунок врахування впливу при розробці високовольтних трансформаторів напруги є невід'ємною частиною вирішення задачі підвищення точності вимірювань за допомогою трансформаторів напруги, що є актуальним науковим питанням сьогодення.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка фізико-математичної моделі високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання, ілюстрація впливу магнітного розсіювання на характеристики незаземлюваного трансформатора напруги, удосконалення характеристик прецизійних незаземлюваних трансформаторів напруги.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Створити фізико-математичну модель високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання, що має симетричну ізоляцію;
- Розвинути метод розрахунку індуктивності та взаємоіндуктивності розсіювання обмоток трансформатору напруги за допомогою програмних пакетів, що дозволяють вирішувати задачі розподілу магнітного поля;

- Дослідити вплив магнітного розсіювання на характеристики високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги;
- Запропонувати метод корекції витків високовольтного трансформатора напруги, з метою підвищення класу точності.

Об’єкт дослідження – магнітне розсіювання високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги.

Предмет дослідження – вплив магнітного розсіювання високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги на його характеристики.

Методи дослідження пов’язані з використанням:

- теорії електричного та магнітного полів в активній частині високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги;
- теорії режимів роботи високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги;
- теорії електричних вимірювань, для визначення властивостей електроізоляційних та магнітних матеріалів, що входять до складу активної частини високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги;
- комп’ютерного моделювання та розрахунку електричних та магнітних полів активної частини високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги у відповідних програмних пакетах;
- обробки даних розрахунків, моделювання та дослідів.

Наукова новизна результатів:

- Вперше розроблено модель високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання для фазного та лінійного режимів його роботи.
- Виявлено, що при симетричній схемі первинної обмотки високовольтного незаземлюваного трансформатора напруги, режим роботи не впливає на похибку визначення коефіцієнту масштабного перетворення напруги та на кутову похибку, за рахунок того, що сума струмів, що протікають через обидві частини первинної обмотки залишається постійною.

Практичне значення одержаних результатів. Проведені дослідження показали можливість проведення проектування та розробок в Україні еталонних трансформаторів напруги класу точності 0,005, що відповідають найвищим світовим стандартам.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з реферату, переліку умовних позначень, вступу, розділів, висновків, списку використаних джерел. Обсяг дисертації становить 98 сторінок, містить 31 рисунок, 39 таблиць, 76 формул.

ABSTRACT

Actuality of theme. Due to the constant increase in the requirements for the systems and installations of metering and accounting of electric energy, there is a problem of increasing the accuracy of electrical measurements.

A common method of measuring high voltage is measuring with the help of voltage transformers, whose accuracy class is influenced by the complex processes that take place in its active part.

Magnetic scattering is one such process, so its calculation and impact in the design of high-voltage voltage transformers is an integral part of the solution to the problem of increasing the accuracy of measurements using voltage transformers, which is a pressing scientific question of today.

The purpose and objectives of the study. The aim of this work is to develop a physic-mathematical model of a high-voltage, non-earthed voltage transformer with magnetic scattering, to illustrate the effect of magnetic scattering on the characteristics of an un-earthed voltage transformer, to improve the characteristics of precision earthed voltage transformers.

To achieve this goal, you must solve the following problems:

- To create a physics-mathematical model of a high-voltage, non-earthed voltage transformer taking into account magnetic scattering with symmetric isolation;
- To develop a method of calculating the inductance and inductance of the scattering of the transformer windings with the help of software packages that allow to solve the problems of magnetic field distribution;
- Investigate the effect of magnetic scattering on the characteristics of a high-voltage, non-earthed voltage transformer;

- To propose a method for correcting the turns of a high-voltage voltage transformer, in order to improve the accuracy class.

The object of the study is the magnetic scattering of a high-voltage, non-grounded voltage transformer.

The subject of the study is the influence of magnetic scattering of a high-voltage, non-earthed voltage transformer on its characteristics.

Scientific novelty of results:

- A model of high-voltage non-earthed voltage transformer with magnetic scattering for phase and linear modes of its operation was first developed.

- It is found that in the symmetric scheme of the primary winding of a high-voltage, non-earthed voltage transformer, the operating mode does not affect the error of determining the coefficient of scale transformation of the voltage and the angular error, due to the fact that the sum of currents flowing through both parts of the primary winding.

The practical significance of the results obtained. The conducted researches showed the possibility of designing and development in Ukraine of standard transformers of a voltage of class of accuracy of 0,005, which meet the highest world standards.

Structure and scope of the thesis. The dissertation consists of abstract, list of symbols, introduction, sections, conclusions, list of used sources. The dissertation volume is 98 pages, contains 31 figures, 39 tables, 76 formulas.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	4
ABSTRACT	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	11
ВСТУП	12
1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ВИМОГ ТА ТЕОРІЙ РОЗРАХУНКУ	
ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ	14
1.1 Основні вимоги до трансформаторів напруги та їх типові конструкції	14
1.2 Огляд теорій розрахунку трансформаторів напруги	19
Висновки до розділу 1	27
2 РОЗРОБКА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	
ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	
НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО РОЗСІЮВАННЯ.....	
28	
Висновки до розділу 2	44
3 РОЗРАХУНОК ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ	
МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОВОГО	
ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО	
РОЗСІЮВАННЯ	
45	
Висновки до розділу 3	62
4 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	
ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	
НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО РОЗСІЮВАННЯ.....	
64	
4.1 Розрахунок фазного та лінійного режимів роботи незаземлюваного ТН з урахуванням магнітного розсіювання	65
4.2 Порівняння фазного режиму роботи незаземлюваного ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання	71

4.3 Корекція витків первинної обмотки незаземлюваного ТН	77
Висновки до розділу 4	79
5 СТАРТАП-ПРОЕКТ	81
5.1 Опис ідеї проекту	81
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	83
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	84
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	89
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	92
Висновки до розділу 5	94
ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВН – висока напруга;

ТН – трансформатор напруги;

ЕРС – електрорушійна сила;

МР – магнітне розсіювання;

УПТН – Установа повірна трансформаторів напруги;

НОМ – напруги однофазний масляний;

КГИ – конденсатор газовый измерительный (конденсатор газовий вимірювальний);

ПВ 45 – перетворювач високовольтний;

FEMM – Finite Element Method Magnetics.

ВСТУП

Вимірювання високих напруг є невід'ємною складовою сучасної електроенергетики, завдяки чому здійснюється контроль обліку та якості електричної енергії. Високу напругу (**ВН**) вимірюють за допомогою трансформаторів напруги (електромагнітного, ємнісного) типу, електрооптичних трансформаторів напруги, подільників напруги (ємнісного, індуктивного та резистивного) характеру, кіловольтметрів, сферичних вимірювальних розрядників і т. д.

Загалом трансформатори напруги (**ТН**) призначені як для вимірювання ВН, так і для живлення та передачі вимірювальної інформації колам приладів вимірювання, автоматики, сигналізації, захисту та керування.

У зв'язку з постійним підвищенням вимог до установок та систем вимірювання і обліку електричної енергії неодмінно виникає задача підвищення точності вимірювання компонентів, що входять до їх складу, в тому числі і трансформаторів напруги.

Еталонні ТН розрізняють за багатьма ознаками, однак одним з головних є точність визначення масштабного коефіцієнта перетворення напруги. На значення цієї величини впливають ряд складних процесів, що відбуваються у активній частині трансформатору. Одним з таких процесів є магнітне розсіювання, що має суттєвий вплив на характеристики ТН. Тому розрахунок потоків магнітного розсіювання (**МР**) та їх урахування при проектуванні високовольтних трансформаторів напруги є невід'ємною частиною вирішення задачі підвищення класу точності еталонних ТН, що є актуальним науковим завданням сьогодення.

У світовій практиці вже відомі трансформатори напруги NVRD з номінальною первинною напругою від 2 до 40 кВ, що мають границі допустимої похибки визначення коефіцієнта масштабного перетворення $\pm 0,005 \%$, та визначення кута $\pm 0,5'$ в діапазоні робочих напруг від 40 до 120 %.

У магістерській дисертації пропонується розрахунковий метод дослідження впливу магнітного розсіювання на параметри незаземлюваного трансформатора напруги з литою ізоляцією, що має найбільшу робочу напругу 45 кВ. Даний трансформатор має стати основною частиною Перетворювача високовольтного 45 кВ (**ПВ 45**), який призначений для використання у складі Установки повірочної трансформаторів напруги (**УПТН**) СА7400, СА7400М1 в якості високовольтного плеча з гальванічною розв'язкою міжфазної напруги ємнісного мосту змінного струму при повірці трифазних та однофазних ТН, що має забезпечувати повірку ТН в діапазоні первинної напруги від 10 В до 45 кВ.

1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ВИМОГ ТА ТЕОРІЙ РОЗРАХУНКУ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

1.1 Основні вимоги до трансформаторів напруги та їх типові конструкції

В стандартах ІЕС 61689-3 [1] та ДСТУ ІЕС 60044-2:2008 [2] міститься вимога щодо визначення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги ε , % [1,2]

$$\varepsilon = \frac{k_r U_s - U_p}{U_p} \cdot 100 \quad (1.1)$$

де k_r – номінальний коефіцієнт масштабного перетворення трансформатора напруги; U_p – дійсне значення первинної напруги; U_s – дійсне значення вторинної напруги, в момент прикладання напруги U_p при інших відповідних умовах вимірювання.

Зазначаються вимоги стосовно класів точності, які можуть бути наступними: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1,0 – 3,0.

Таблиця 1.1

Границі похибки напруги і кутової похибки вимірювальних трансформаторів напруги [2]

Клас точності	Похибка напруги (коефіцієнту трансформації) у відсотках, \pm	Кутова похибка, \pm	
		Хвилини	Сантирадіани
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	Не нормують	Не нормують

Похибка напруги і кутова похибка за номінальної частоти не повинні перевищувати значення, наведені в табл. 1.1 за будь-якої напруги від 80 % до

120 % від номінальної напруги і за навантагами від 25 % до 100 % від номінальної навантаги за коефіцієнта потужності 0,8.

Стандарти [1,2] містять також вимоги і для трансформаторів напруги для захисту.

Таблиця 1.2

Границі похибки напруги і кутової похибки трансформаторів напруги для захисту [2]

Клас точності	Похибка напруги (коефіцієнту трансформації) у	Кутова похибка, \pm	
		Хвилини	Сантірадіани
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

Похибка напруги і кутова похибка за номінальної частоти не повинні перевищувати значення, наведено в табл. 1.2 за напруги, що становить 5% від номінальної напруги та за номінальної напруги, збільшеної на номінальний коефіцієнт підвищення напруги (1,2; 1,5 або 1,9), та за навантаги від 25 % до 100 % від номінального навантаження за коефіцієнтом потужності 0,8.

За напруги, що становить 2 % від номінальної, границі допустимих похибок напруги і кутової похибки за навантаги від 25 % до 100 % від номінального за коефіцієнта потужності 0,8, повинні бути в два рази вище за ті, що наведено в табл. 1.2.

Також в [1,2] містяться вимоги стосовно нормальних та спеціальних умов експлуатації; номінальних значень напруги; потужності; коефіцієнта підвищення напруги; вимоги до ізоляції; стійкості до короткого замикання; вимоги механічної міцності; вимоги до випробувань ТН; маркування і т. д.

Існує окремий стандарт ДСТУ ГОСТ 23625-2003 [3] для еталонних трансформаторів напруги, в якому зазначені вимоги щодо ТН класів точності 0,05 – 0,1 – 0,2.

Методику повірки ТН регламентує ГОСТ 8.216 [6], даний стандарт поширюється на заземлювані та незаземлювані однофазні та трифазні електромагнітні, ємнісні та електронні (з аналоговим виходом) вимірювальні (трансформатори для вимірювання та захисту) трансформатори [6].

Принцип роботи Установки повірочної ТН СА7400, СА7400М1 до якої має увійти Перетворювач високовольтний 45 кВ, основним елементом якого є однофазний незаземлюваний трансформатор з симетричною ізоляцією, що розроблюється дисертантом, закладений в установці 1, що визначена в [6].

В [6] містяться вимоги до похибок еталонних повірочних установок.

Таблиця 1.3

Вимоги до похибок еталонних повірочних установок

Границі допустимої основної похибки вимірювання повіряемого трансформатору			Границі допустимої основної похибки вимірювання установки з урахуванням систематичних значень похибок, вказаних в свідоцтві про її повірку			Границі допустимої основної похибки при передаванні одиниць розміру установці		
Напруги, $\varepsilon(\text{Tr})$	Кута фазового зсуву, $\Delta\varphi(\text{Tr})$		Напруги, $\varepsilon(\text{Tr})$	Кута фазового зсуву, $\Delta\varphi(\text{Tr})$		Напруги, $\varepsilon(\text{Tr})$	Кута фазового зсуву, $\Delta\varphi(\text{Tr})$	
%	срад	хв	%	срад	хв	%	срад	хв
$\pm 0,005$	$\pm 0,009$	$\pm 0,3$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,0045$	$\pm 0,15$	$\pm 0,0008$	$\pm 0,0015$	$\pm 0,03$
$\pm 0,01$	$\pm 0,015$	$\pm 0,5$	$\pm 0,005$	$\pm 0,0075$	$\pm 0,25$	$\pm 0,0016$	$\pm 0,0025$	$\pm 0,1$
$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	$\pm 1,0$	$\pm 0,01$	$\pm 0,015$	$\pm 0,5$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$	$\pm 0,15$
$\pm 0,05$	$\pm 0,09$	$\pm 3,0$	$\pm 0,025$	$\pm 0,045$	$\pm 1,5$	$\pm 0,008$	$\pm 0,015$	$\pm 0,3$
$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 5,0$	$\pm 0,05$	$\pm 0,09$	$\pm 3,0$	$\pm 0,015$	$\pm 0,03$	$\pm 1,0$
$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 10,0$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 5,0$	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	$\pm 1,5$

Конструкція таких типових трансформаторів напруги як НОМ-6, НОМ-10, НОМ-15, НОМ-35, ЗНОМ-35-65, ЗНОЛ.06, НОЛ.0.8, ЗНОЛ-35 досить детально описується в [4].

В однофазних трансформаторах напруги в основному використовуються магнітопроводи стрижневого та броньового типу. Магнітопровід шихтується окремими прямокутними пластинами електротехнічної сталі. Пластини ізолюють одна від одної.

Переріз стрижнів має форму ступінчастої фігури, переріз ярем може бути як прямокутним так і ступінчастим. Ступінчата форма магнітопроводу дозволяє збільшити заповненість сталлю циліндричних котушок.

Обмотки ТН є найголовнішим елементом трансформатора напруги, від якості виготовлення обмоток, перерізу проводу, кількості витків залежить здатність отримання необхідних характеристик. В основному в конструкції ТН використовують провід круглого перерізу.

В якості каркасів для намотки котушок слугують бакелітові та склотекстолітові циліндри. Для міжшарової ізоляції використовують, наприклад, кабельний та телефонний папери. Для ізоляції кінців обмоток можуть використовуватись різного роду електроізоляційні трубки.

Обмотка НН трансформатора напруги зазвичай має відносно невелику кількість витків та може бути намотаною в один або два шари. Для обмотки ВН притаманна велика кількість шарів та можливий поділ на декілька котушок. Кількість витків по мірі віддалення від стрижня зменшуються для забезпечення необхідної ярмової ізоляції.

З метою вирівнювання розподілу напруженості в конструкції можуть використовувати екрани та ємнісні кільця.

Повздовжній переріз обмоток трансформатора типу НОМ-35-66 показаний на рис. 1.1.

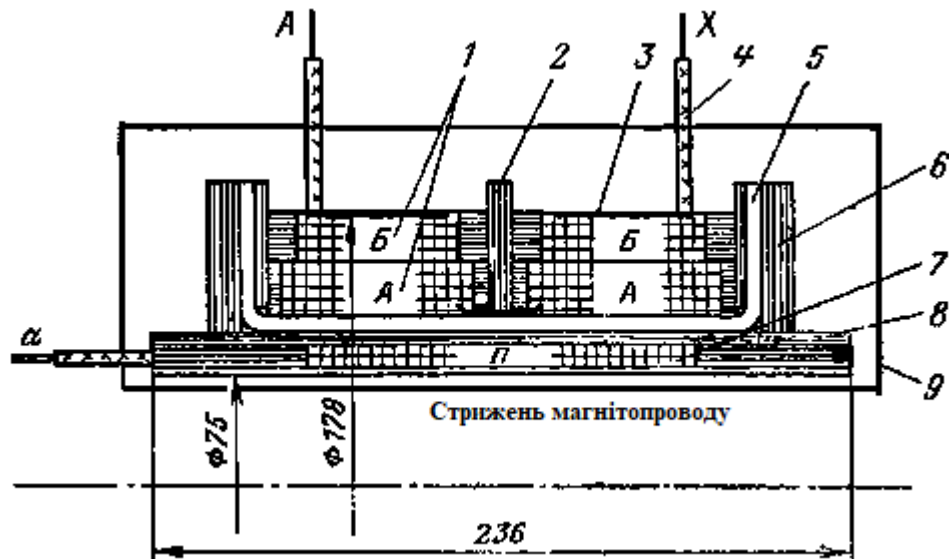


Рисунок 1.1 Повздовжній переріз обмоток трансформатора
типу НОМ-35-66 [4]

1 – обмотка ВН (котушки А та Б); 2 – ізолюючі шайби з електрокартону; 3 – електростатичний екран; 4 – загальний вивідний кінець (із гнучкого проводу) від обмотки ВН та електростатичного екрану; 5 – відбортований циліндр із кабельного паперу; 6 – кінцеві шайби з електрокартону; 7 – обмотка НН; 8 – циліндр із електрокартону; 9 – контури вікна магнітопроводу [4]

1.2 Огляд теорій розрахунку трансформаторів напруги

Основним режимом роботи в якому працює трансформатор напруги є неробочий хід, адже вимірювальні прилади, що приєднують до вторинної обмотки ТН мають великий вхідний опір.

Як відомо, при розрахунку силових трансформаторів падінням напруги та кутовим зсувом при неробочому ході взагалі нехтують, тому і вважають що коефіцієнт трансформації силового трансформатора можна спрощено порахувати як відношення значення первинної напруги до вторинної. Тому іноді може вийти так, що силовий трансформатор не увійде в запланований клас точності.

В режимі **неробочого ходу** [4], змінну високу напругу, яка прикладається до первинної обмотки ТН відповідно до закону Кірхгофа розкладають на вектор електрорушійної сили $-E_{10}$, що має від'ємний знак та активної U_{a10} і реактивної U_{p10} складових падінь напруги, що виникають унаслідок протікання струму неробочого ходу.

Струм неробочого ходу складається із реактивної (намагнічуючий струм I_M) та активної складових I_a , що визвані втратами неробочого ходу. Вектор повного струму неробочого ходу I_0 є геометричною сумою векторів I_M та I_a , рис. 1.2.

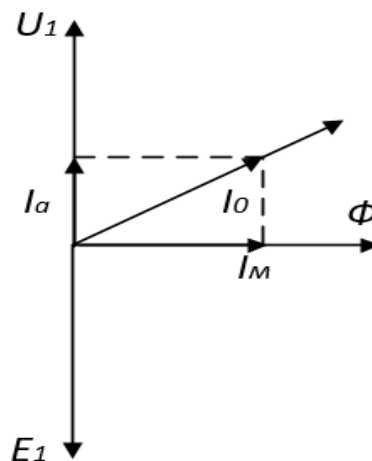


Рисунок 1.2. Спрощена векторна діаграма неробочого ходу

Автором [4] припускається, що внаслідок малого значення кута між векторами U_1 та $-E_{10}$ можна вважати, що вектор U_1 дорівнює своїй проекції на вісь ординат. Тоді похибка напруги, виражена у відсотках, дорівнює:

$$\varepsilon_0 = -(U_{a10}\sin\alpha + U_{p10}\cos\alpha) \quad (1.4)$$

де U_{a10} та U_{p10} – активне та реактивне падіння напруги в первинній обмотці, в % первинної напруги U_1 ; α – кут між вектором струму неробочого ходу I_0 та його реактивною складовою I_M (кут магнітного запізнення).

Знак мінус перед дужками означає, що похибка від’ємна.

Значення U_{a10} та U_{p10} автор [4] перетворює наступним чином:

$$U_{a10} = U_{a1} \frac{I_0}{I_1} = U_{a1} \frac{I_a}{I_1 \sin\alpha} = U_{a1} \frac{i_a}{\sin\alpha}; \quad (1.5)$$

$$U_{p10} = U_{p1} \frac{I_0}{I_1} = U_{p1} \frac{I_p}{I_1 \cos\alpha} = U_{p1} \frac{i_p}{\cos\alpha} \quad (1.6)$$

де U_{a1} та U_{p1} – активна та реактивні складові падіння напруги в первинній обмотці при номінальному навантаженні; i_a та i_p – відношення активної та реактивної складових струму неробочого ходу до номінального струму (активна та реактивна складові струму неробочого ходу у відсотках до номінального струму).

Після перетворення в [4], пропонується визначення похибки за наступною формулою:

$$\varepsilon_0 = -(U_{a1}i_a + U_{p1}i_p) \quad (1.7)$$

Кутова похибка на неробочому ході згідно визначення є кут $\Delta\varphi_0$ між векторами U_1 та $-E_{10}$. Внаслідок малого значення кута $\Delta\varphi_0$, можна прийняти $tg\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_0$ [4].

Аналогічно, користуючись векторною діаграмою, автор надає формулу для визначення кутової похибки, вираженої у хвилинах [4]:

$$\Delta\varphi_0 = \frac{3440}{100} (U_{a10} \cos\alpha - U_{p10} \sin\alpha) = 34,4(U_{a1} i_p - U_{p1} i_a) \quad (1.8)$$

Кутова похибка вважається позитивною, якщо вектор $-E_1$ випереджає вектор U_1 .

При під'єднанні **навантаження** до вторинної обмотки ТН, в обмотках виникають навантажувальні струми. В [4] наводиться векторна діаграма трансформатора напруги при під'єднанні до його вторинної обмотки навантаження активно-індуктивного характеру.

Для більшої наглядності векторну діаграму дещо перетворюють. По-перше, вектори вторинних ЕРС. і струму приводять до первинних, тобто припускають $E_1 = E'_2$ та $I'_1 = I'_2$ та, по-друге, вектори вторинних струмів та напруг повертають так, що вектори $-E_1$ та E'_2 , а також I'_1 та I'_2 суміщають. Це дає можливість розглядати вектори падінь напруги в одному і тому масштабі.

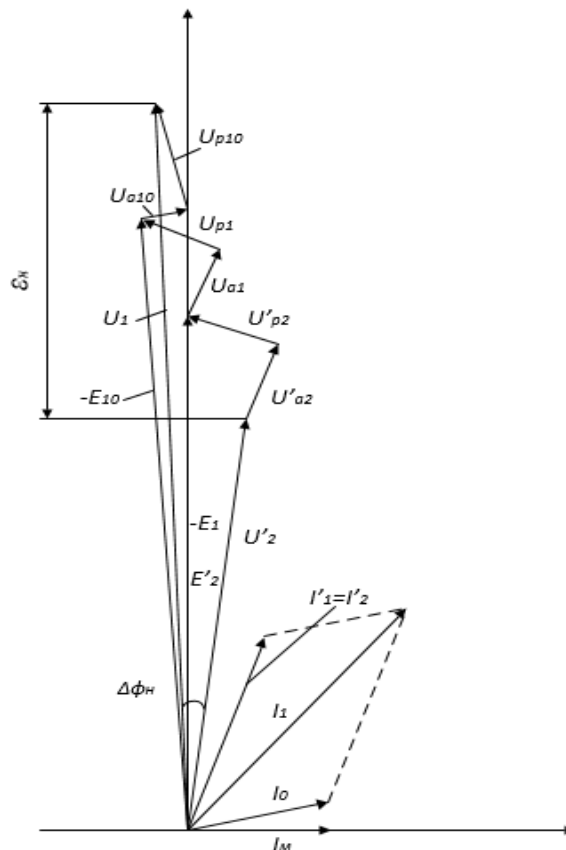


Рисунок 1.4. Векторна діаграма при активно-індуктивному навантаженні [4]

Вектори мають наступні позначення:

U_{a10}, U_{p10} – активна та реактивна складові падіння напруги в первинній обмотці від струму неробочого ходу I_x ;

U_{a1}, U_{p1} – активна та реактивна складові падіння напруги в первинній обмотці від струму навантаження I'_1 ;

U'_{a2}, U'_{p2} – активна та реактивна складові падіння напруги у вторинній обмотці (приведені до первинної обмотки);

U_1 – первинна напруга;

$-E_{10}$ – первинна проти-ЕРС при неробочому ході;

$-E_1$ – первинна проти-ЕРС при навантаженні;

E'_2 – приведена до первинної обмотки вторинна е.р.с. при навантаженні;

U'_2 – приведена до первинної обмотки вторинна напруга;

I'_1, I'_2 – первинний та вторинний приведені навантажувальні струми;

I_1 – загальний первинний струм;

I_0 – струм неробочого ходу;

ε_H – похибка напруги;

$\Delta\varphi_H$ – кутова похибка.

Так як вторинний струм I'_2 навантаження визиває у вторинній обмотці активне та реактивне падіння напруги U'_{a2} та U'_{p2} , вторинна ЕРС E'_2 , крім вторинної напруги U'_2 , повинна також компенсувати ці падіння напруги. Тоді, користуючись діаграмою, в [4] наводять формулу для визначення вторинної напруги:

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{U}'_{a2} - \dot{U}'_{p2} \quad (1.9)$$

Первинний навантажувальний струм I'_1 , що виникає за законом повного струму в первинній обмотці, також викликає в ній активне та реактивне падіння напруги U_{a1} та U_{p1} . Таким чином згідно векторної діаграми:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{U}_{a10} + \dot{U}_{p10} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{p1} \quad (1.10)$$

Похибка визначення напруги ε_n , що викликана навантаженням, визнається за формулою [4]:

$$\varepsilon_n = -(U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2) \quad (1.11)$$

де $U_a = U_{a1} + U_{a2}$; $U_p = U_{p1} + U_{p2}$ – сумарні активні та реактивні падіння напруги в первинні та вторинні обмотках; $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності навантаження.

Кутова похибка при навантаженні, визначається аналогічно [4]:

$$\Delta \varphi_n = 34,4(U_a \sin \varphi_2 - U_p \cos \varphi_2) \quad (1.12)$$

Повна похибка при навантаженні визнається як сума похибок від струму холостого ходу та струму навантаження, тобто $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_n$ (1.13) (повна похибка визначення напруги) та $\Delta \varphi = \Delta \varphi_0 + \Delta \varphi_n$ (1.14) (повна кутова похибка).

У [4] автор наголошує вплив реактивних складових падінь напруги, що викликають магнітні потоки розсіювання, але формул або методики визначення індуктивності розсіювання не наводить.

Існує багато публікації стосовно розрахунку силових трансформаторів, у яких приділяється велика увага щодо магнітного розсіювання. Наприклад у [5] автор робить акцент на тому, що питання пов'язані з полями розсіювання є досить складними та потребують вивчення та вдосконалення. Проблемам магнітного розсіювання присвячено цілу главу, в якій автор торкається питання щодо розрахунку індуктивного опору розсіювання силових

трансформаторів з різними типами обмоток та втрат, що викликані магнітним розсіюванням.

В публікації [7] розроблено фізичну модель трансформатора напруги на основі схеми заміщення та системи рівнянь. В моделі враховується вплив на характеристики ТН як індуктивності розсіювання обмоток, так і взаємоіндуктивності розсіювання. Схема заміщення представлена на рис. 1.5.

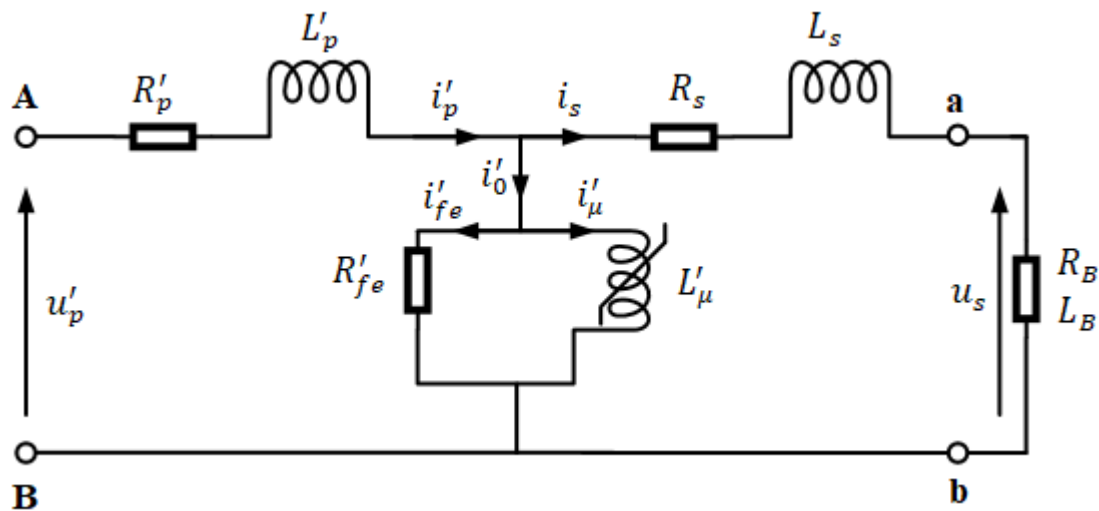


Рисунок 1.5. Схема заміщення ТН за [7]

i'_p – значення струму первинної обмотки; R'_p – активний опір первинної обмотки; L'_p – індуктивність розсіювання первинної обмотки; i_s – значення струму вторинної обмотки; R_s – активний опір вторинної обмотки; L_s – індуктивність розсіювання вторинної обмотки; i'_0 – струм неробочого ходу; i'_{fe} – активна складова струму неробочого ходу; i'_μ – реактивна складова струму неробочого ходу; R'_{fe} – значення активної складової магнітного опору; L'_μ – значення індуктивності реактивної складової магнітного опору; R_B – активний опір навантаження вторинної обмотки; L_B – індуктивність навантаження вторинної обмотки [7].

$$\frac{di'_p}{dt} = \frac{1}{L'_p} (u'_p - \frac{d\psi}{dt} - R'_p i'_p) \quad (1.15)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_B i_s + L_B \frac{di_s}{dt} \quad (1.16)$$

$$i'_\mu = f(\Psi) \quad (1.17)$$

$$i'_p = i_s + i'_{fe} + i'_\mu \quad (1.18)$$

$$u_s = R_B i_s + L_B \frac{di_s}{dt} \quad (1.19)$$

Також автор [7] надає формули для знаходження індуктивності розсіювання обмоток ТН, що має магнітопровід двострижневого типу, і наголошує, що індуктивність розсіювання не можна вважати постійною величиною, як це прийнято, а вона залежить від напруги та навантаження. [7]

$$L'_p = 4\pi z_s^2 \frac{l_{sr}}{b_r} \left(\frac{\delta}{2} + \frac{a_p}{3} \right) 10^{-7} \quad (1.20)$$

$$L_s = 4\pi z_s^2 \frac{l_{sr}}{b_r} \left(\frac{\delta}{2} + \frac{a_s}{3} \right) 10^{-7} \quad (1.21)$$

де z_s – кількість витків вторинної обмотки; l_{sr} – середня довжина повітряного зазору між обмотками; δ – товщина повітряного зазору між обмотками; b_r – еквівалентна довжина обмотки; a_p – товщина первинної обмотки; a_p – товщина вторинної обмотки.

Загалом, з оглянутого вище, можна зробити висновок, що питанням розробки комплексної фізико-математичної моделі ТН, науковці займаються вже багато часу. Здебільшого, в основу своїх моделей, автори закладають векторні діаграми, схеми заміщення та системи рівнянь. Для розрахунку індуктивності розсіювання силових та вимірювальних трансформаторів, раніше переважно використовували формули, які залежали від геометричних параметрів активної частини трансформатору.

Трансформатор напруги за своєю будовою є складнішим ніж силовий, завдяки тому що високовольтна обмотка ТН має багато витків, які в різних шарах можуть мати різний діаметр та крок намотки.

Прогресивним методом розрахунку електричних та магнітних полів високовольтних конструкцій є комп'ютерне моделювання в програмних пакетах, що працюють на основі методу скінченних елементів та дозволяють визначати значення величин, що характеризують магнітні та електричні поля у будь якій точці конструкції. До таких програм належать: Ansys Maxwell, FEMM, Elcut, Comsol Multiphysics та багато інших.

На думку дисертанта, найбільш вдалою фізико-математичною моделлю ТН є модель [8], яка підпорядковується системі рівнянь, що враховує значення індуктивності розсіювання трансформатора напруги, яке можна розрахувати у відповідних програмних пакетах. Детальний опис моделі розглянутий у розділі [2].

Висновки до розділу 1

Питання підвищення точності метрологічних характеристик та повірки трансформаторів напруги прописані у відповідних стандартах [1, 2, 6].

Проблемами проектування силових та вимірювальних трансформаторів в науковому світі приділяється чимало уваги, завдяки чому розроблено ряд фізико-математичних моделей. Загалом більшість з них дуже схожа, основою моделі переважно слугує векторна діаграма або схема заміщення.

На важливості впливу індуктивності розсіювання автори акцентують увагу, але точних методик та формул визначення в літературі для ТН дуже мало, хоча для проектування силових трансформаторів, можливо, цього і достатньо. Тому актуальним є питання пошуку та розробки нових теорій для ТН, які враховують магнітне розсіювання.

2 РОЗРОБКА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО РОЗСІЮВАННЯ

В основу моделі закладені положення, що досить розгорнуто та вдало описані у [8]. Автором пропонується розрахунок магнітного поля автотрансформатора напруги та оцінка впливу магнітних потоків на масштабний коефіцієнт перетворення напруги та кутову похибку.

Обмотка високої напруги розроблюваного ТН є багатошаровою та має поділ на дві однакові симетричні котушки, загальним для них є перший шар обмотки, який виконано проводом збільшеного діаметру задля зменшення значення напруженості електричного поля та збільшенню механічної міцності обмотки. Аналогічним чином виконані останні шари обмотки.

Магнітопровід є броньовим, переріз стрижня має форму ступінчастої фігури, переріз ярем – прямокутний.

Тому логічним, є представлення активної частини вісесиметричною моделлю у циліндричній системі координат. Цілком побудувати таку модель неможливо, адже стрижень не є циліндричної форми, а має бути замінений на циліндр еквівалентного діаметру з урахуванням коефіцієнту заповнення сталлю, а довжина ярем може бути додана до довжини стрижня.

Для спрощення розрахунку реальну форму перерізу обмотки ВН замінюємо еквівалентним прямокутником, який має таку саму ж кількість шарів та витків.

На рис. 2.1 зображена вісесиметрична модель активної частини незаземлюваного трансформатора напруги (показано одну частину, оскільки конструкція симетрична).

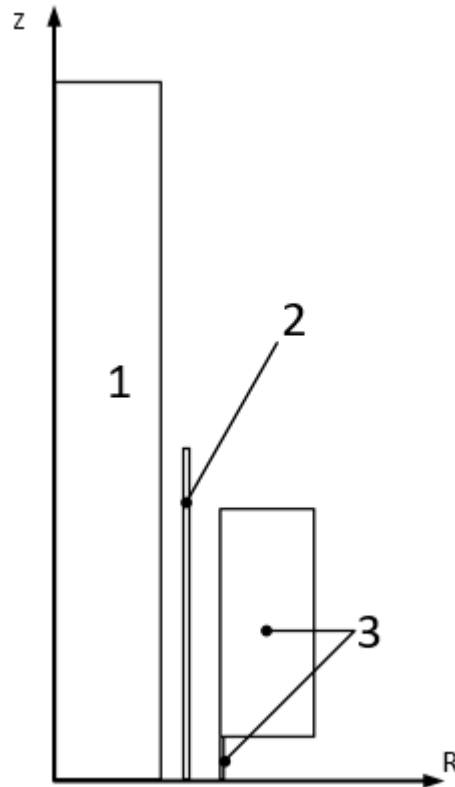


Рисунок 2.1 Вісесиметрична модель активної частини незаземлюваного трансформатора напруги

1 – стрижень магнітопроводу, 2 – вторинна обмотка, 3 – первинна обмотка

В [8] робиться припущення, що загальний наскрізний струм або магніторушійна сила у перерізі обмотки є рівномірними, і дорівнюють добутку стуму одного витка на загальну кількість витків обмотки.

На рис. 2.1 потоками розсіювання є всі магнітні потоки, які створені наскрізним струмом, що протікає через переріз обмотки перпендикулярно до площини перерізу, бо вони цілком або частково замикаються по повітрю.

Створені загальним струмом, що вважається розподіленим рівномірно по перерізу обмотки, магнітні потоки, є зчепленими з витками обмотками та в загальному випадку є різними для кожного витка. Сума поточозчеплень окремого витка або об'єднаних груп витків дорівнює загальному

потокозчепленню. Потокозчеплення кожного витка визначається потоком Φ_i , що проходить через площину витка.

Автором [8] пропонується розкласти потік Φ_i на три складові: Φ_0 – магнітний потік, що проходить через переріз стрижня магнітопроводу; Φ_1 – магнітний потік, який проходить через бічну поверхню стрижня магнітопроводу та не охоплює i -виток, оскільки не перетинає його площину; Φ_2 – магнітний потік, який проходить через частину площі витка за межами стрижня, перпендикулярно до площини витка, не включаючи потік у площині витка, що проходить в перерізі стрижня магнітопроводу. Тобто загальний потік крізь площину будь-якого витка дорівнює [8]:

$$\Phi_i = \Phi_0 - \Phi_{1i} + \Phi_{2i} \quad (2.1)$$

Очевидним є той факт, що розрахунок потоків для кожного окремого витка є неможливим та “довговічним” процесом із-за дуже великої кількості витків. Тому виконується розподіл обмоток на групи витків – сегменти, та вважаємо розподіл наскрізного струму рівномірним для всіх сегментів. В реальних конструкціях ТН, діаметр проводу та міжшарова ізоляція можуть мати різні значення для окремих шарів, тому потрібно враховувати дольові коефіцієнти з використанням відношень витків відповідного сегменту до загальної кількості витків у обмотці $\frac{W_i}{W_\Sigma}$.

На рис. 2.2. представлений поділ обмоток на сегменти, кожному сегменту призначений відповідний номер. Первинна обмотка розбита на 38 сегментів, перший шар має 8 сегментів (для половини обмотки – 4), шари основного проводу обмотки розділені на 18 сегментів (для половини обмотки – 9), останні три шари розбиті на 12 сегментів (для половини обмотки – 6).

Вторинна обмотка ТН розділена на 10 рівних сегментів (a-j).

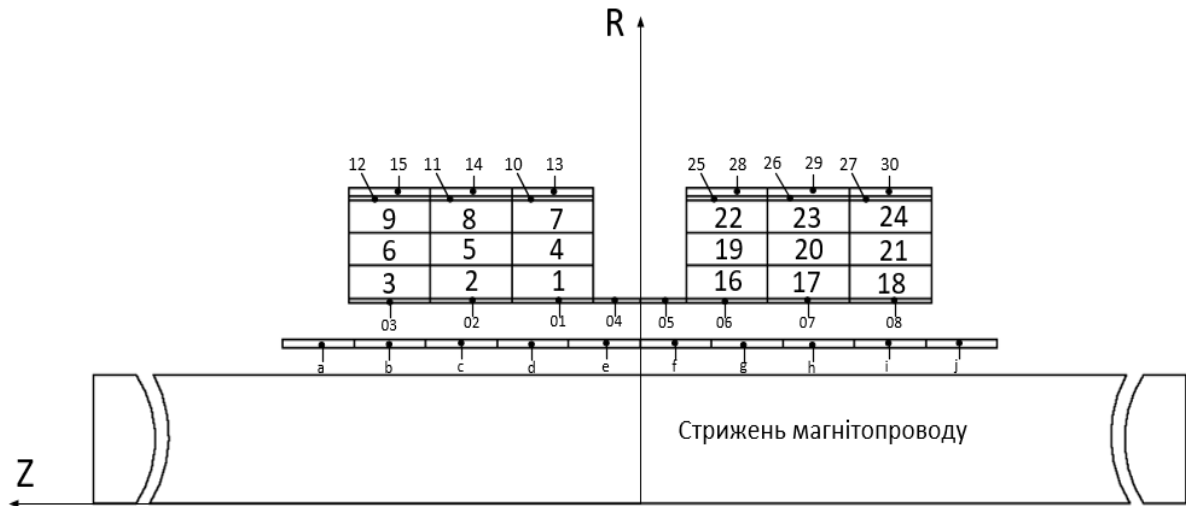


Рисунок 2.2. Поділ первинної та вторинної обмоток трансформатора напруги на сегменти

У [8] наводиться формула розрахунку еквівалентної індуктивності розсіювання автотрансформатора напруги, яка приведена до загальної кількості витків, але її можна використати для трансформатора напруги, звівши до загальної кількості витків первинної обмотки: [8]

$$L_{s'_{\text{екв}}} = \frac{W_1^2 \cdot (\sum_{i=1}^n (\Phi_{2i} - \Phi_{1i}) \cdot \frac{2 \cdot W_i}{W_1} - \sum_{j=1}^m (\Phi_{2j} - \Phi_{1j}) \cdot \frac{2 \cdot W_j}{W_2})}{I} \quad (2.2)$$

де Φ_{1i}, Φ_{1j} – складові потоків крізь бічну поверхню магнітопроводу; Φ_{2i}, Φ_{2j} – складові потоків в площах виокремлених горизонтальних дисків з максимальними радіусами r_i, r_j на висотах z_i, z_j ; W_1 – кількість витків первинної обмотки; W_2 – кількість витків вторинної обмотки; $I = i_0 \cdot W_1$ – магніторушійна сила первинної обмотки W_1 зі струмом i_0 . [8]

Щоб досягти більшої точності розрахунку значення приведеної індуктивності зі складу формули (2.2) вилучена складова магнітного потоку Φ_0 , що є набагато більшою за Φ_1 та Φ_2 , завдяки цьому використовуються числа одного порядку.

У [8] на основі формули (2.2) висувається припущення, що можна знайти таку просторову конструкцію витків обмотки, для якої еквівалентна

індуктивність розсіювання буде дорівнювати нулю, або заздалегідь заплановане значення.

Для розрахунку індуктивності розсіювання обмоток та її зменшення використовують параметричне моделювання, змінюючи геометричні розміри обмоток. Автором [8] детально описується дана методика, що буде використана дисертантом для розрахунку індуктивності розсіювання незаземлюваного трансформатора напруги.

Вхідними даними для розрахунку є:

- 1) Відносні магнітні проникності активної частини трансформатора, а саме стрижня магнітопроводу $\mu_{\text{ст}}$, для якого можна взяти середнє значення 5000 відносних одиниць, і для ізоляції та провідної частини обмоток, яке становить 1.
- 2) Площа перерізу електротехнічної сталі стрижня магнітопроводу, $S_{\text{ст}}$.
- 3) Довжина стрижня магнітопроводу $L_{\text{ст}}$.
- 4) Геометричні розміри первинної та вторинної обмоток трансформатора напруги.
- 5) Значення струму в обмотці i_0 , яке для спрощення розрахунків можна прийняти $i_0 = 1 \text{ A}$, або близьким до очікуваного середньоквадратичного значення струму холостого ходу.
- 6) Координати (R_i, Z_i) та (R_j, Z_j) геометричних центрів первинної та вторинної обмоток, для яких кількість витків є сталою величиною.
- 7) Кількість витків первинної обмотки трансформатора напруги, W_1 .
- 8) Кількість витків вторинної обмотки трансформатора напруги, W_2 .

Для проведення розрахунків, на основі вхідних даних, створюється у відповідному програмному середовищі вісесиметрична модель трансформатора напруги в циліндричній системі координат R0Z.

- 1) Визначення потоків розсіювання виконується у режимі магнітостатичної задачі, що описується рівнянням стаціонарного

магнітного поля: $\nabla \times (\mu_0^{-1} \cdot \mu^{-1} \cdot \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}$, де ∇ – диференціальний оператор Гамільтона; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – відносна магнітна проникність; \vec{A} – векторний магнітний потенціал, Вб/м; \vec{J} – вектор густини сторонніх струмів, А/м².

- 2) Для зовнішніх границь області розрахунку магнітного поля встановлюють спеціальні умови: векторний магнітний потенціал дорівнює нулю $A_\varphi = 0$, границю $r = 0$ позначають як вісь симетрії.
- 3) Розміри області зовнішніх границь розрахунку магнітостатичної задачі мають бути більшими за розмір досліджуваної активної частини ТН більш ніж у 10 разів по відповідній вісі.
- 4) Значення струму, що відповідає перерізу певного сегменту має бути визначене, як добуток значення струму в обмотці, тобто струму одного витку на кількість витків у відповідному сегменті $I_i = i_0 \cdot W_i$, для випадку $i_0 = 1$ А, $I_i = W_i$.
- 5) Стрижень магнітопроводу ТН моделюється стрижнем циліндричної форми, довжина якого співпадає з реальною (для врахування ярмового розсіювання, вклад якого оцінюють на рівні 10 %, довжина ярем може спрощено бути додана до довжини стрижня, адже реальне врахування ярмового розсіювання можна дослідити лише при розрахунку тривимірної моделі активної частини, розрахунок потоків розсіювання якої може займати декілька години або навіть декілька діб) довжиною стрижня, а діаметр $D_{\text{ст}}$ розраховують, виходячи з площі фігури реального стрижня $S_{\text{ст}}$, яка враховує коефіцієнт заповнення.
- 6) Для кожного об'єкту моделі встановлюють фактичні відносні проникності.

Розрахунок магнітного поля виконується за допомогою методу скінченних елементів. Програмне забезпечення повинно забезпечувати умови:

- задавання вхідних даних;
- вирішення задачі стаціонарного магнітного поля;
- обчислення значень, що характеризують магнітне поле у будь-якій точці області розрахунку;
- здатності інтегрувати значення, що характеризують магнітне поле по поверхням, які перпендикулярні вісі Z у циліндричній системі R0Z.

Для кожного сегменту розрахункової моделі активної частини визначається геометричний центр, куди проводиться відрізок прямої, початок якого лежить на осі Z та є перпендикулярним до неї. Кількість сегментів у [8] рекомендується обирати таким чином, щоб площа сегменту не перевищувала 1 % від зальної площі обмотки. Для ТН, кількість витків якого може складати до 100000, це займе дуже багато часу. Тому потрібно оперувати часовими можливостями та потужністю обчислювальної техніки.

Шляхом інтегрування Z та R – складових вектора індукції магнітного поля вздовж відрізка прямої, що проведений у геометричний центр сегменту, можна визначити магнітний потік розсіювання. Оскільки, значення R – складової є на два-три порядки меншим, ніж значення Z – складової, у роботі пропонується врахування тільки Z – складової, що дозволить зменшити час розрахунку.

Для розрахунку вихідної напруги трансформатора напруги необхідна система рівнянь, що враховує всі магнітні та електричні взаємодії в активній частині ТН.

Магнітний потік Φ , який проходить по замкненому магнітному контуру, задовольняє рівнянню [8]:

$$\sum i \cdot W - \sum R_m \cdot \Phi = 0 \quad (2.3)$$

де i – струм обмотки з кількістю витків W , що створює магнітний потік Φ в замкненому контурі з магнітним опором R_m . Тобто, для основного магнітного потоку в магнітопроводі ТН можна записати рівняння у комплексному вигляді:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2}{\dot{R}_m} \quad (2.4)$$

де \dot{I}_1 – комплексний струм первинної обмотки ТН, \dot{I}_2 – комплексний струм вторинної обмотки ТН, \dot{R}_m – комплексний магнітний опір магнітопроводу трансформатора напруги, W_1 , W_2 – кількості витків первинної та вторинної обмоток.

Для визначення струмів та напруг для окремих витків обмоток трансформатора, автором [8] виконується деталізація рівнянь трансформатора та вводяться нові поняття:

- часткової індуктивності розсіювання L_{i1} , яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i1} , що є зчепленим i -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А;
- часткової взаємодуктивності розсіювання M_{i2} , яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i2} , що є зчепленим з i -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А;
- часткової індуктивності розсіювання L_{k2} , яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{k2} , що є зчепленим з k -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А;
- часткової взаємодуктивності розсіювання M_{k1} , яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{k1} , що є зчепленим з k -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А.

$$\dot{U}_{i1} = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_{i1} + \dot{I}_1 \cdot W_{i1} (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2} \cdot W_{i1} \quad (2.7)$$

$$\dot{U}_{k2} = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_{k2} - \dot{I}_2 \cdot W_{k2} (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1} \cdot W_{k2} \quad (2.8)$$

В [8] автором, деталізовані рівняння для витків обмоток ТН та їх груп, приводяться до системи рівнянь:

$$\dot{U}_{i1} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2}) \cdot W_{i1}; \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_{k2} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1}) \cdot W_{k2}; \quad (2.10)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \sum_1^n (r_{i1} + j \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} - \dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^n M_{i2} \cdot W_{i1}; \quad (2.11)$$

$$\dot{U}_2 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_2 - \dot{I}_2 \cdot \sum_1^m (r_{k2} + j \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_{k2} + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \sum_1^m M_{k1} \cdot W_{k2}; \quad (2.12)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2}{R_M}; \quad (2.13)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_H}. \quad (2.14)$$

де \dot{Z}_H – комплексний опір навантаження вторинної обмотки.

Систему рівнянь (2.9-2.14) покладемо у основу розрахунку незаземлюваного трансформатора напруги.

Як вже зазначалось, первинна обмотка складається з двох однакових котушок, які з'єднані першим шаром обмотки. Вторинна обмотка захищена електростатичним екраном. Тобто для незаземлюваного ТН можна розглядати модель “середня точка первинної обмотки – екран”.

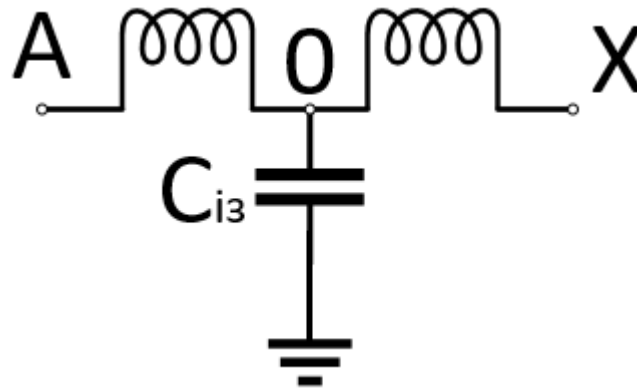


Рисунок 2.4 Модель незаземлюваного ТН “середня точка первинної обмотки – екран”. А, Х – кінці первинної обмотки, О – середня точка первинної обмотки, C_{iz} – ємність між середньою точкою первинної обмотки та електростатичним екраном.

Розділимо первинну обмотку на дві окремі котушки “обмотки” А та Б, та складемо систему рівнянь для них на основі рівнянь (2.9-2.14).

$$\dot{U}_A = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_A \cdot \left(\frac{R_A}{W_A} + j \cdot \omega \cdot L_{iA} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_B \cdot M_{iB}) \cdot W_A; \quad (2.15)$$

$$\dot{U}_B = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_B \cdot \left(\frac{R_B}{W_B} + j \cdot \omega \cdot L_{kB} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_A \cdot M_{kA}) \cdot W_B; \quad (2.16)$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B = \dot{U}_{BX}; \quad (2.17)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_A \cdot W_A + \dot{I}_B \cdot W_B}{\dot{R}_M}; \quad (2.18)$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_H = \dot{I}_A; \quad (2.19)$$

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_H}{\dot{Z}_H}. \quad (2.20)$$

де \dot{U}_A, \dot{U}_B – напруга для витків “обмоток” А та Б;

\dot{I}_A, \dot{I}_B – струм “обмоток” А та Б;

R_A, R_B – активні опори “обмоток” А та Б;

W_A, W_B – кількість витків в “обмотках” А та Б;

L_{iA} – часткова індуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{iA} , що є зчепленим i -м витком при протіканні по “обмотці” А струму 1 А;

M_{iB} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{iB} , що є зчепленим з i -м витком при протіканні по “обмотці” Б струму 1 А;

L_{kB} – часткова індуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{kB} , що є зчепленим k -м витком при протіканні по “обмотці” Б струму 1 А;

M_{kA} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{kA} , що є зчепленим з k -м витком при протіканні по “обмотці” А струму 1 А;

$\dot{U}_{вх}$ – вхідна напруга первинної обмотки, яку задають;

$\dot{I}_н$ – струм навантаження;

$\dot{U}_н$ – напруга на навантаженні;

$\dot{Z}_н$ – комплексний опір навантаження, що визначається як $\dot{Z}_н = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{із}}$.

Розподіл напруг та струмів згідно рівнянь (2.15-2.20) представлений на рис. 2.5.

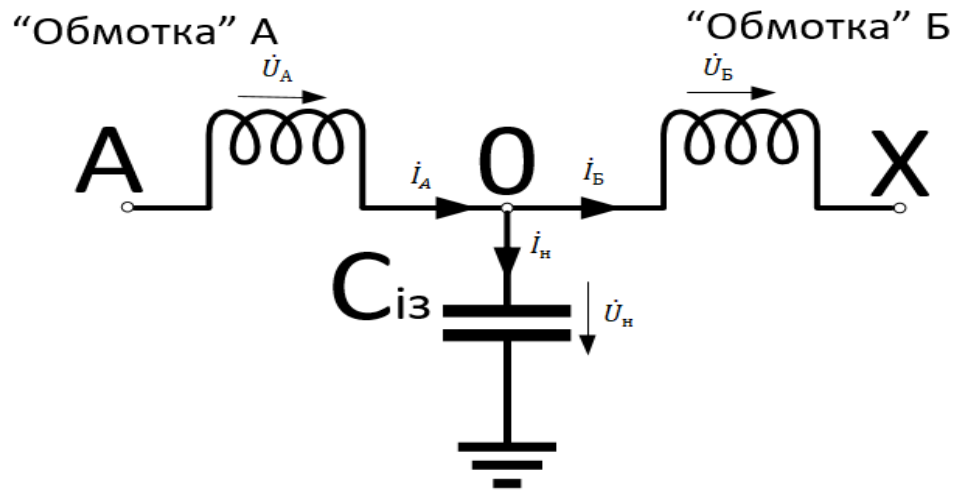


Рисунок 2.5 Розподіл напруг та струмів згідно системи рівнянь (2.15-2.20)
для незаземлюваного трансформатора напруги

Оскільки, "обмотки" А та Б є абсолютно однаковими та симетричними відносно середньої точки, то можна вважати, що $W_A = W_B$, $R_A = R_B$, $L_{iA} = L_{kB}$,

$$M_{iB} = M_{kA}.$$

З урахуванням цього можна переписати рівняння (2.15-2.20):

$$\dot{U}_A = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_A \cdot \left(\frac{R_A}{W_A} + j \cdot \omega \cdot L_{iA} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_B \cdot M_{kA}) \cdot W_A; \quad (2.21)$$

$$\dot{U}_B = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_B \cdot \left(\frac{R_A}{W_A} + j \cdot \omega \cdot L_{iA} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_A \cdot M_{kA}) \cdot W_A; \quad (2.22)$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B = \dot{U}_{BX}; \quad (2.23)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_A \cdot W_A + \dot{I}_B \cdot W_A}{R_M}; \quad (2.24)$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_H = \dot{I}_A; \quad (2.25)$$

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_H}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{iz}}}. \quad (2.26)$$

Незаземлюваний трансформатор напруги може працювати в режимах, коли один з кінців первинної обмотки є заземленим, або коли обидва кінці не є заземленими (при подачі лінійної напруги).

Режим роботи при якому один з кінців первинної обмотки заземляють, будемо називати фазним режимом. Заземлимо кінець Х “обмотки” Б, тоді $\varphi_B = 0$, $\dot{U}_B = \dot{U}_H$, $\dot{U}_{BX} = U_{BX} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$.

Перепишемо систему рівнянь для фазного режиму:

$$\dot{U}_A = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_A \cdot \left(\frac{R_A}{W_A} + j \cdot \omega \cdot L_{iA} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_B \cdot M_{kA}) \cdot W_A; \quad (2.27)$$

$$\dot{U}_B = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_B \cdot \left(\frac{R_A}{W_A} + j \cdot \omega \cdot L_{iA} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_A \cdot M_{kA}) \cdot W_A; \quad (2.28)$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B = U_{BX} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}; \quad (2.29)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_A \cdot W_A + \dot{I}_B \cdot W_A}{R_M}; \quad (2.30)$$

$$\dot{I}_B + \dot{I}_H = \dot{I}_A; \quad (2.31)$$

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_B}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{i3}}}. \quad (2.32)$$

Розподіл напруг та струмів для фазного режиму роботи незаземлюваного ТН представлений на рис. 2.6.

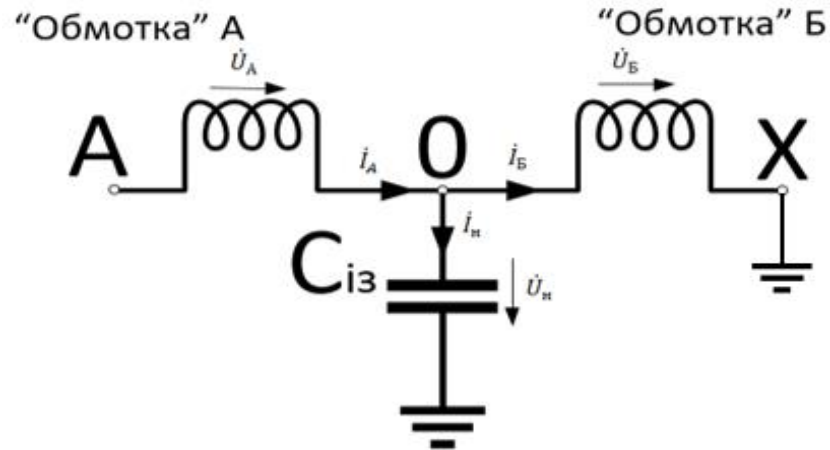


Рисунок 2.6 Розподіл напруг та струмів для фазного режиму роботи незаземлюваного ТН

Режим роботи, при якому обидва кінці “обмоток” А та Б не заземлюють, а прикладають лінійну напругу, будемо називати лінійним режимом. Вхідна напруга, як і при фазному залишається такою ж $\dot{U}_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$, напругу на навантаженні знайдемо за допомогою рис.2.7.

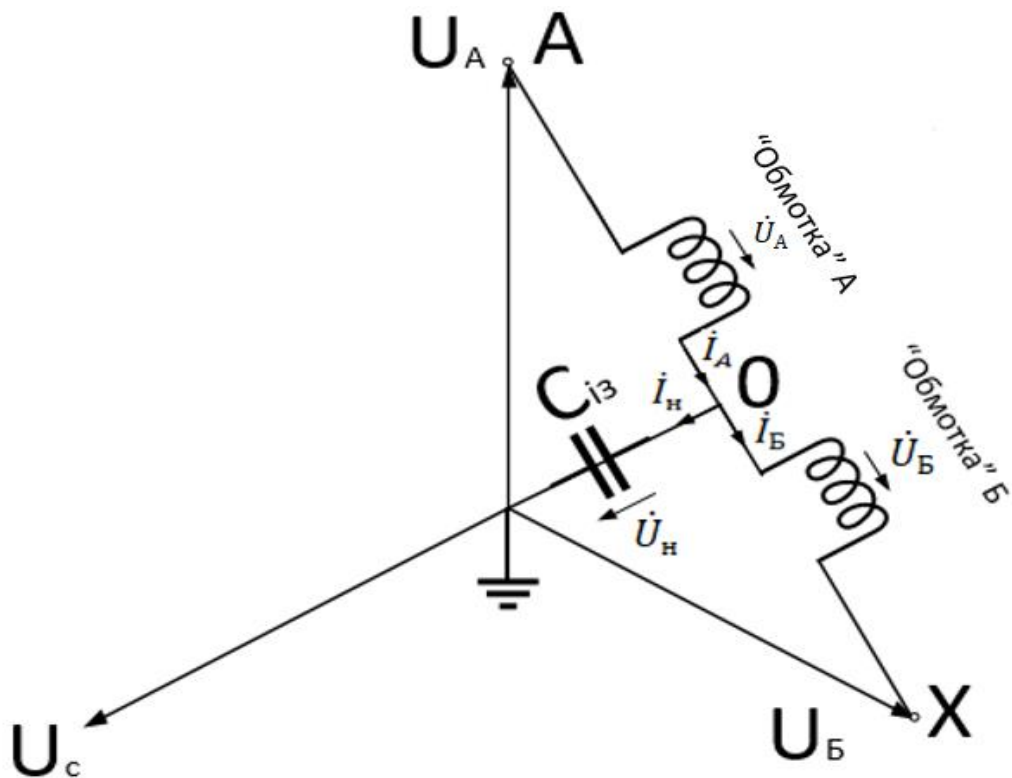


Рисунок 2.7 Розподіл напруг та струмів для лінійного режиму роботи незаземлюваного ТН

Якщо вважати, що між кінцями А – Х прикладено $\dot{U}_{\text{BX}} = U_{\text{BX}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$, то виходячи з рис. 2.7, напруга на навантаженні дорівнює $\dot{U}_{\text{H}} = \frac{U_{\text{BX}} \cdot e^{j\pi}}{2\sqrt{3}}$.

Перепишемо систему рівнянь для лінійного режиму роботи:

$$\dot{U}_{\text{A}} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_{\text{A}} \cdot \left(\frac{R_{\text{A}}}{W_{\text{A}}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{IA}} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_{\text{B}} \cdot M_{\text{kA}}) \cdot W_{\text{A}}; \quad (2.33)$$

$$\dot{U}_{\text{B}} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_{\text{B}} \cdot \left(\frac{R_{\text{A}}}{W_{\text{A}}} + j \cdot \omega \cdot L_{\text{IA}} \right) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_{\text{A}} \cdot M_{\text{kA}}) \cdot W_{\text{A}}; \quad (2.34)$$

$$\dot{U}_{\text{A}} + \dot{U}_{\text{B}} = U_{\text{BX}} \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}; \quad (2.35)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_{\text{A}} \cdot W_{\text{A}} + \dot{I}_{\text{B}} \cdot W_{\text{A}}}{R_{\text{M}}}; \quad (2.36)$$

$$\dot{I}_{\text{B}} + \dot{I}_{\text{H}} = \dot{I}_{\text{A}}; \quad (2.37)$$

$$\dot{I}_{\text{H}} = \frac{\frac{U_{\text{BX}} \cdot e^{j\pi}}{2\sqrt{3}}}{j \cdot \omega \cdot C_{\text{I3}}}. \quad (2.38)$$

З опису вищезазначених систем рівнянь моделі незаземлюваного ТН для фазного та лінійного режимів роботи, можна побачити, що для обох систем рівнянь невідомими є \dot{I}_{A} , \dot{I}_{B} , \dot{I}_{H} , \dot{U}_{A} , \dot{U}_{B} , $\dot{\Phi}$. Різницею між системами є формула для визначення струму навантаження.

Величини $W_{\text{A}}, R_{\text{A}}, R_{\text{M}}, C_{\text{I3}}, L_{\text{IA}}, M_{\text{kA}}$, які будемо називати вхідними, можуть бути визначенні шляхом розрахункових формул, дослідів або моделюванням та розрахунком у відповідних програмних пакетах. Розрахунок та опис цих величин буде показаний у наступному розділі дисертації.

Напругу вторинної обмотки ТН для обох режимів будемо визначати за формулою:

$$\dot{U}_{\text{2}} = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_{\text{2}} + \dot{I}_{\text{A}} \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^l M_{\text{IA}} + \dot{I}_{\text{B}} \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^l M_{\text{IB}} \quad (2.39)$$

де W_2 – кількість витків вторинної обмотки, M_{lA} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{lA} , що є зчепленим l -м витком при протіканні по “обмотці” А струму 1 А; M_{lB} – часткова взаємоіндуктивність розсіювання, яка еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{lB} , що є зчепленим l -м витком при протіканні по “обмотці” Б струму 1 А.

Внаслідок симетричності “обмоток” А та Б, $M_{lA} = M_{lB}$, тоді формула (2.39) прийме вигляд:

$$\dot{U}_2 = j \cdot \omega \cdot \Phi \cdot W_2 + j \cdot \omega \cdot \sum_1^l M_{lA} \cdot (\dot{I}_A + \dot{I}_B) \quad (2.40)$$

Висновки до розділу 2

Розроблено фізико-математичну модель незаземлюваного трансформатора напруги ТН з урахуванням магнітного розсіювання “середня точка первинної обмотки – екран”, в основу якої покладені система рівнянь для визначення напруг та струмів окремих витків або їх груп та метод визначення індуктивності розсіювання, що описується в [8].

Внаслідок симетрії первинної обмотки, її розділено на дві рівні симетричні “обмотки”, та прийнято, що їхні часткові індуктивності та взаємоіндуктивності є рівними.

Запропоновано видозміненні системи рівнянь незаземлюваного ТН для фазного та лінійного режимів його роботи, і показано відмінність між ними у вигляді формул для визначення струму навантаження.

З РОЗРАХУНОК ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІЗИКО- МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО РОЗСІЮВАННЯ

Величини $W_A, R_A, \dot{R}_m, C_{iz}, L_{iA}, M_{kA}$ є вхідними для систем рівнянь (2.27-2.32), (2.33-2.38) фазного та лінійних режимів роботи. Опишемо розрахунок кожної з цих величин.

При максимальній робочій напрузі трансформатору напруги, що становить $U_{1\text{макс}} = 45$ кВ, значення напруги вторинної обмотки дорівнює $U_{2\text{макс}} = 300$ В. Відповідно номінальними є напруги $U_{1\text{ном}} = 37,5$ кВ, $U_{2\text{ном}} = 250$ В. Номінальний коефіцієнт трансформації дорівнює $k_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{37,5 \text{ кВ}}{250 \text{ В}} = 150$.

Для розрахункової кількості витків обмоток було взято максимальне значення номінальної індукції $B_{\text{ном}} = 0,83$ Тл, площа ступінчастої фігури стрижня магнітопроводу становить $S_c = 2824,65 \text{ мм}^2$, коефіцієнт заповнення сталлю $k_c = 0,975$. Відповідно кількість витків вторинної та первинної обмоток становлять:

$$W_2 = \frac{U_{2\text{ном}}}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{ном}} \cdot S_c \cdot k_c} = \frac{250}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,83 \cdot 0,00282465 \cdot 0,975}; \quad (3.1)$$

$W_2 = 492,65$. З урахуванням округлення приймаємо $W_2 = 494$.

$$W_1 = \frac{U_{1\text{ном}}}{4,44 \cdot f \cdot B_{\text{ном}} \cdot S_c \cdot k_c} = \frac{37500}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,83 \cdot 0,00282465 \cdot 0,975}; \quad (3.2)$$

$W_1 = 73897,7$; з урахуванням вибору $W_2 = 494$, $W_1 = W_2 \cdot k_{\text{ном}} = 74100$.

$$\text{Відповідно, } W_A = W_B = \frac{W_1}{2} = \frac{74100}{2} = 37050.$$

Первинна обмотка ТН має на першому та трьох останніх шарах провід більшого діаметру, ніж основна частина намотки. Перший та останні три

шари виконанні з проводу діаметром провідної частини 0,67 мм, основний провід має діаметр 0,14 мм.

Відповідно сумарний активний опір первинної обмотки буде мати три складові, розрахуємо кожен з них, якщо відома довжина проводу $l_{1\text{шару пров.}} = 33 \text{ м}$, $l_{\text{основ.пров.}} = 26669 \text{ м}$, $l_{\text{ост.шарів пров.}} = 46 \text{ м}$:

$$R_{1\text{шару пров.}} = \frac{\rho \cdot l_{1\text{шару пров.}}}{\frac{\pi \cdot d_{1\text{шару пров.}}^2}{4}} = \frac{0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot 33 \text{ м}}{\frac{\pi \cdot (0,67 \text{ мм})^2}{4}} = 1,6 \text{ Ом} \quad (3.3)$$

$$R_{\text{основ.пров.}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{основ.пров.}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{основ.пров.}}^2}{4}} = \frac{0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot 26669 \text{ м}}{\frac{\pi \cdot (0,14 \text{ мм})^2}{4}} = 30318,3 \text{ Ом} \quad (3.4)$$

$$R_{\text{ост.шарів пров.}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{ост.шарів пров.}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{ост.шарів пров.}}^2}{4}} = \frac{0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot 46 \text{ м}}{\frac{\pi \cdot (0,67 \text{ мм})^2}{4}} = 2,3 \text{ Ом} \quad (3.5)$$

де $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий опір міді.

$$R_1 = R_{1\text{шару пров.}} + R_{\text{основ.пров.}} + R_{\text{ост.шарів пров.}} = 30322,2 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

Виходячи з цього, активний опір “обмотки” А дорівнює $R_A = \frac{R_1}{2} = \frac{30322,2 \text{ Ом}}{2} = 15166,1 \text{ Ом}$.

Комплексний магнітний опір основному магнітному потоку можна визначати за допомогою характеристик електротехнічної сталі та геометричних розмірів, або дослідним шляхом.

Було проведено дослід зняття детальної вольт-амперної характеристики магнітопроводу з використанням тестової обмотки. Дослід проводився приладом L200, №1. Даний прилад може одночасно реєструвати значення струму, напруги та кута зсуву між ними.

Як відомо з однієї сторони $\dot{\Phi} = \frac{i \cdot W}{R_M}$, з іншої $\dot{\Phi} = \frac{\dot{U}}{j \cdot \omega \cdot W}$, звідси:

$$\dot{R}_M = \frac{j \cdot i \cdot \omega \cdot W^2}{\dot{U}} = \frac{I \cdot \omega \cdot W^2}{U} \cdot e^{j\varphi_M} \quad (3.7)$$

де I – струм тестової обмотки, U – напруга на тестовій обмотці, W – кількість витків тестової обмотки, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота, φ_M – кут магнітного запізнення.

Кількість витків тестової обмотки у досліді складала $W = 130$, тоді при обраній номінальній індукції $B_{\text{ном}} = 0,83$ Тл, номінальна напруга на тестовій обмотці: $U_{\text{ном.тест}} = 4,44 \cdot f \cdot B_{\text{ном}} \cdot S_c \cdot k_c \cdot W$;

$$U_{\text{ном.тест}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,83 \cdot 0,00282465 \cdot 0,975 \cdot 130 = 65,97 \text{ В.}$$

Результати обробки вольт-амперної характеристики тестової обмотки представлені у табл. 3.1 та на рис. 3.1, 3.2.

Таблиця 3.1

Результати обробки вольт-амперної характеристики тестової обмотки

% $U_{\text{ном.тест}}$	Виміряні величини		
	U, В	I, мА	$\cos \Psi U(I)$
0,027	0,018	1,30	0,208
0,046	0,03	1,84	0,2291
0,060	0,04	2,02	0,277
0,080	0,05	2,16	0,3076
0,089	0,06	2,28	0,3312
0,105	0,07	2,34	0,3547
0,147	0,10	2,44	0,387
0,265	0,18	2,86	0,4147
0,788	0,52	4,081	0,4072
1,213	0,8	5,197	0,403
1,534	1,012	6,041	0,399
3,103	2,047	9,343	0,4233

Продовження таблиці 3.1

4,602	3,036	11,32	0,4927
7,533	4,97	16,78	0,492
9,988	6,59	19,91	0,532
12,195	8,046	23,21	0,5375
19,870	13,11	32,4	0,585
22,871	15,09	35,72	0,6022
30,465	20,1	43,34	0,62
37,952	25,04	50,46	0,65
45,546	30,05	57,48	0,66
48,547	32,03	60,35	0,66
53,079	35,02	64,65	0,67
60,672	40,03	72,19	0,67
68,250	45,03	80,52	0,66
75,889	50,07	89,91	0,65
78,921	52,07	94,06	0,64
83,392	55,02	100,4	0,63
89,121	58,8	109,2	0,6157
98,033	64,68	125,7	0,5818
107,870	71,17	150,7	0,5296
112,341	74,12	169,5	0,5301
118,782	78,37	199,1	0,4448
130,635	86,19	293,9	0,3986
143,594	94,74	461,9	0,3438
149,717	98,78	596,4	0,2565
158,084	104,3	726,2	0,19889
173,695	114,6	1094	0,199
180,364	119	1285	0,1687
190,973	126	1609	0,1687

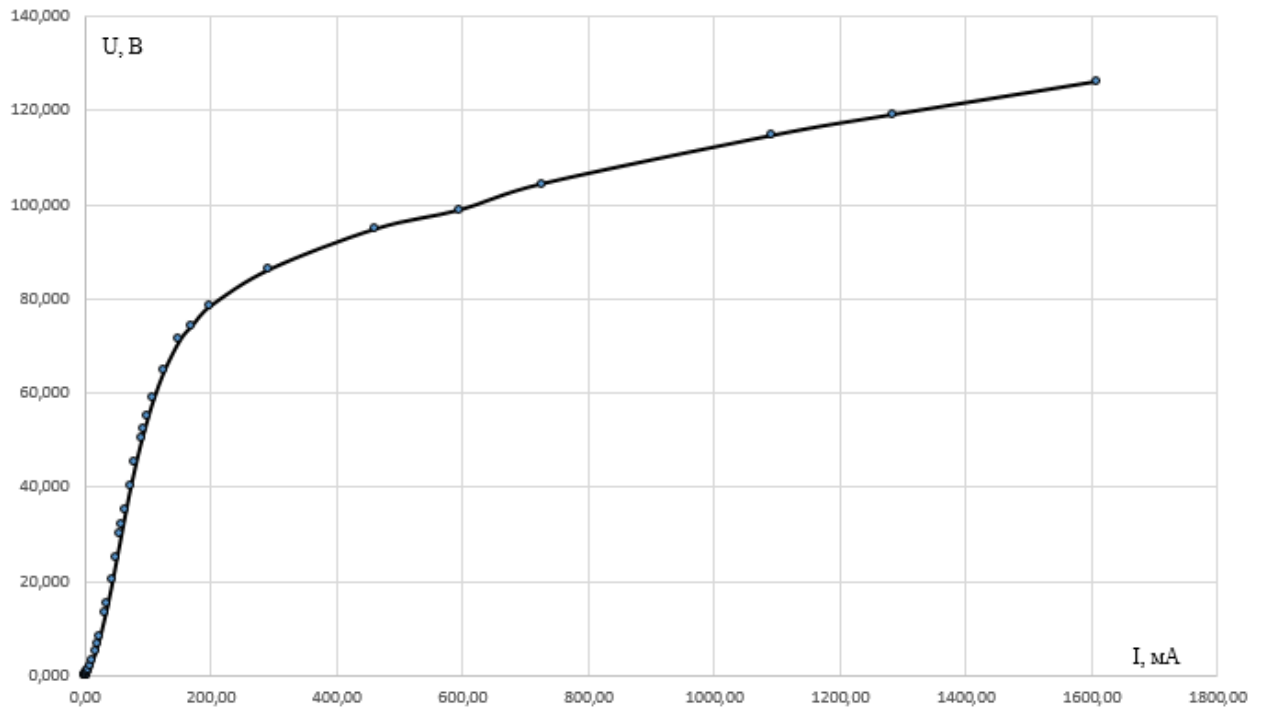


Рисунок 3.1 Вольт-амперна характеристика тестової обмотки

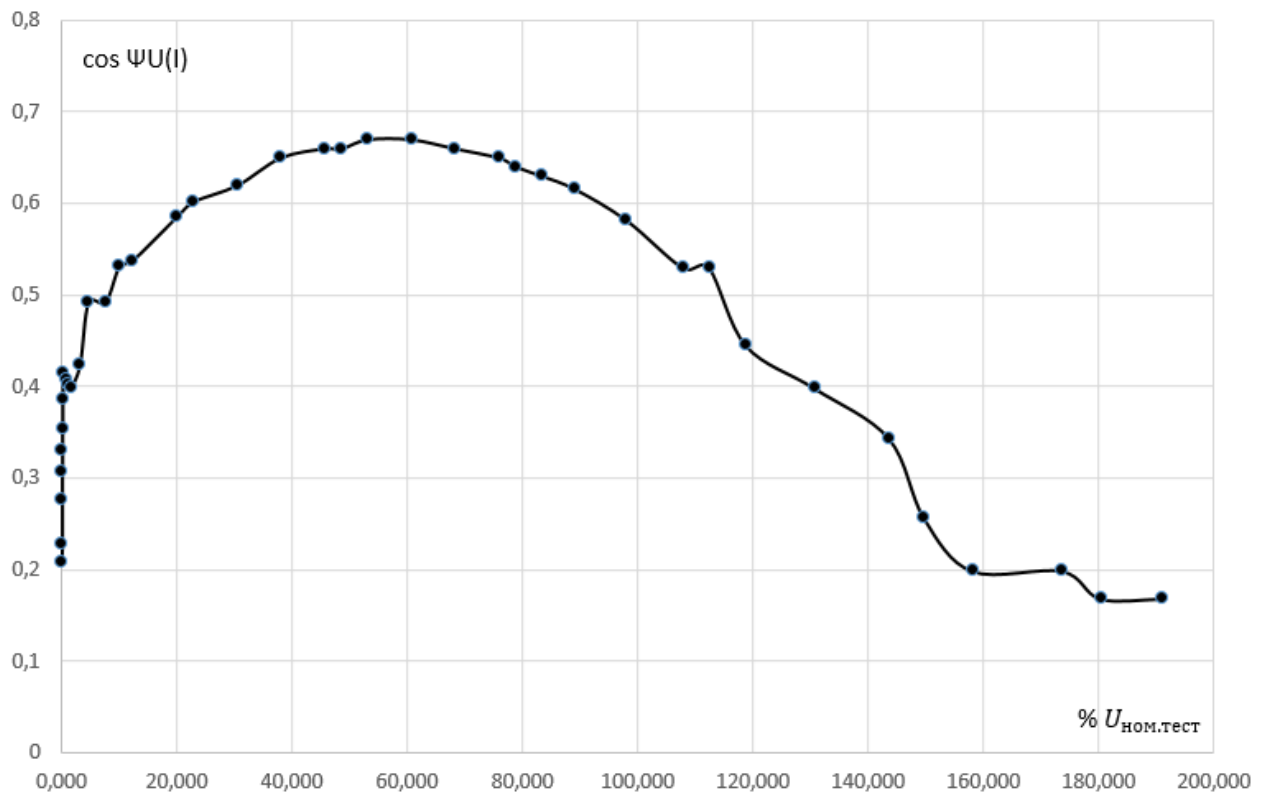


Рисунок 3.2 Залежність $\cos \Psi U(I)$ від напруги на тестовій обмотці у відсотках від номінальної $\% U_{\text{ном.тест}}$

Кут магнітного запізнення дорівнює:

$$\varphi_m = 90^\circ - \Psi U(I) \quad (3.8)$$

де $\Psi U(I)$ – кут між напругою і струмом тестової обмотки.

Визначимо характеристики комплексного магнітного опору магнітопроводу трансформатора на основі даних табл.3.1. Результати представимо у вигляді табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Характеристики комплексного магнітного опору магнітопроводу трансформатора R_m

% Уном.тест	Комплексний магнітний опір	
	R_m (абсолютне значення)	φ_m^0 , (кутових градусів)
0,027	383549,26	11,966
0,046	323735,97	13,205
0,060	272351,46	16,044
0,080	216569,35	17,878
0,089	204618,90	19,306
0,105	180193,68	20,740
0,147	133212,07	22,734
0,265	86725,01	24,467
0,788	41646,61	23,996
1,213	34473,00	23,732
1,534	31677,05	23,482
3,103	24220,60	25,010
4,602	19786,14	29,488
7,533	17916,45	29,441
9,988	16032,54	32,111

Продовження таблиці 3.2

12,195	15307,75	32,484
19,870	13114,71	35,776
22,871	12561,41	37,001
30,465	11442,19	38,290
37,952	10693,73	40,517
45,546	10150,53	41,275
48,547	9998,54	41,275
53,079	9796,45	42,043
60,672	9569,91	42,043
68,250	9488,95	41,275
75,889	9528,99	40,517
78,921	9585,92	39,766
83,392	9683,44	39,024
89,121	9855,11	37,976
98,033	10312,92	35,550
107,870	11236,54	31,949
112,341	12135,30	31,983
118,782	13481,49	26,378
130,635	18095,02	23,457
143,594	25872,06	20,073
149,717	32039,44	14,824
158,084	36947,77	11,432
173,695	50658,12	11,439
180,364	57302,36	9,672
190,973	67764,44	9,672

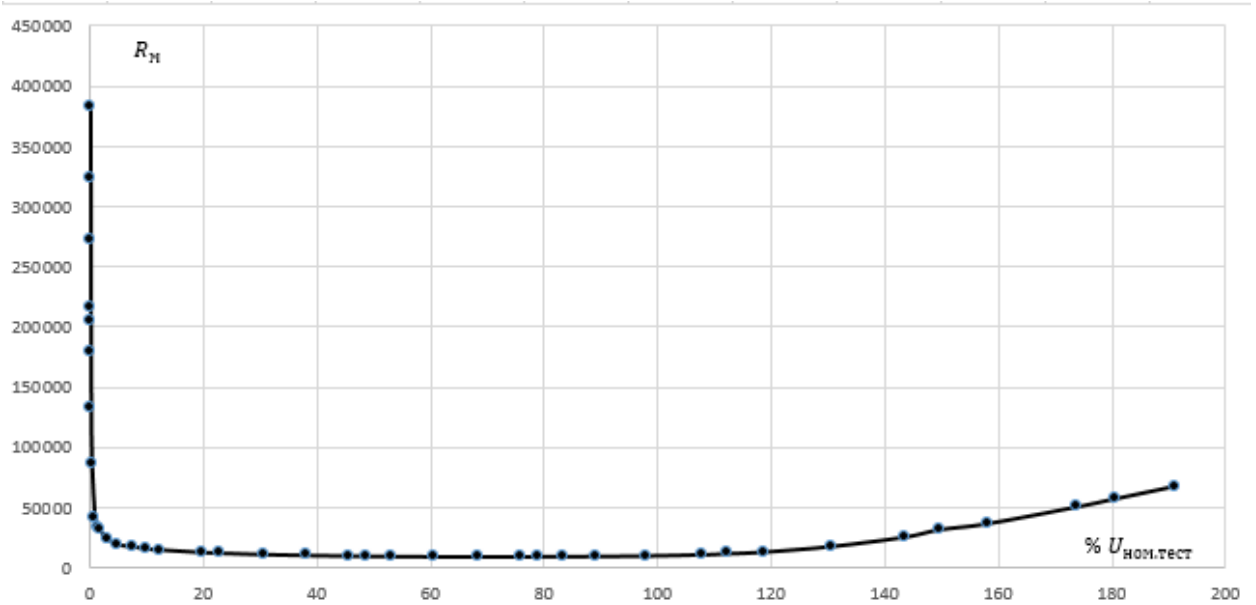


Рисунок 3.3 Залежність абсолютного значення комплексного магнітного опору магнітопроводу трансформатора від напруги на тестовій котушці у відсотках від номінальної, % $U_{\text{ном.тест}}$

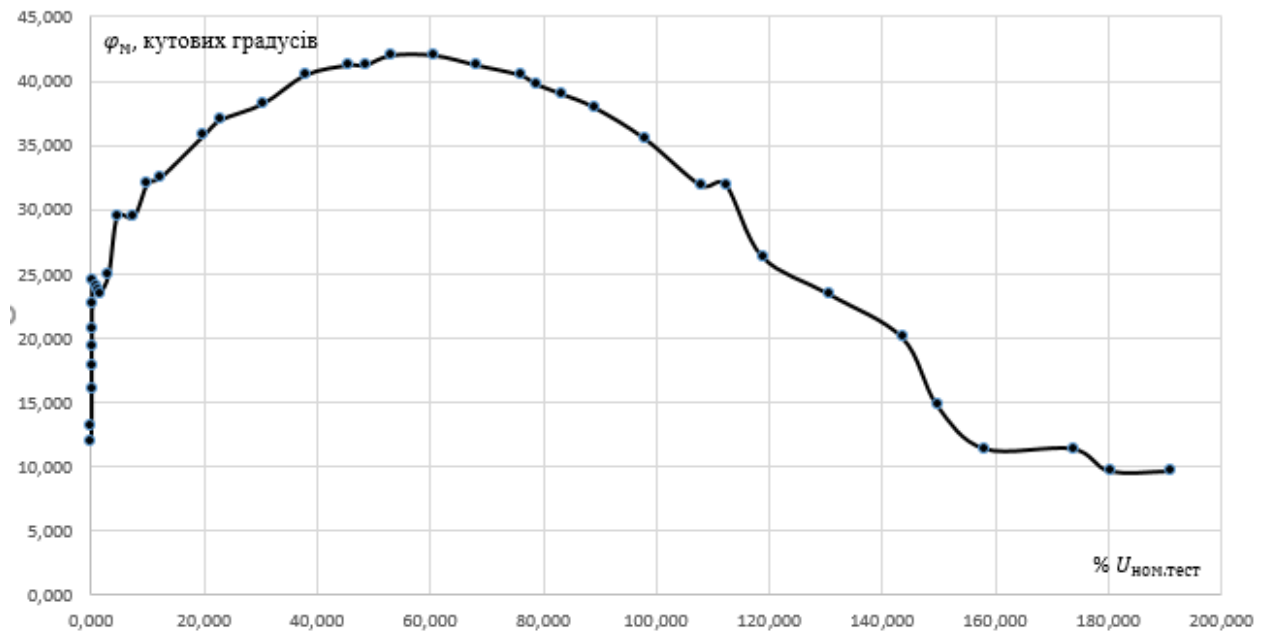


Рисунок 3.4 Залежність кута запізнення комплексного магнітного опору магнітопроводу трансформатора від напруги на тестовій котушці у відсотках від номінальної, % $U_{\text{ном.тест}}$

Міжобмоткова основна ізоляція виконана з епоксидного компаунду, що має відносну діелектричну проникність $\epsilon = 3,5$. Товщина ізоляції складає 7

мм. Оцінимо ємність ізоляції між першим шаром первинної обмотки та електростатичним екраном, використовуючи формулу для визначення ємності циліндричного конденсатора:

$$C_{\text{із}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,150928}{\ln\left(\frac{92}{76,8}\right)} = 162,66 \text{ пФ} \quad (3.9)$$

де ε – відносна діелектрична проникність компаунду, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – електрична стала, l – довжина циліндру (ширина першого шару первинної обмотки, складає 0,15092 м), D_2 – діаметр першого шару первинної обмотки (складає 92 мм), D_1 – діаметр електростатичного екрану (складає 76,8 мм).

Формула (3.9) в загальному випадку використовується для циліндрів однакової довжини та не враховує наявності крайових ефектів. Оскільки, у нашому випадку, довжина першого шару первинної обмотки дорівнює 150,928 мм, а довжина екрану – 262 мм, то розрахунок за формулою (3.9) не є точним.

Обчислимо $C_{\text{із}}$ за допомогою комп'ютерного моделювання у середовищі програми FEMM [11] (Finite Element Method Magnetics). Для цього потрібно вирішити задачу електростатичного поля циліндричного конденсатора з різною довжиною обкладок у вісесиметричній системі координат.

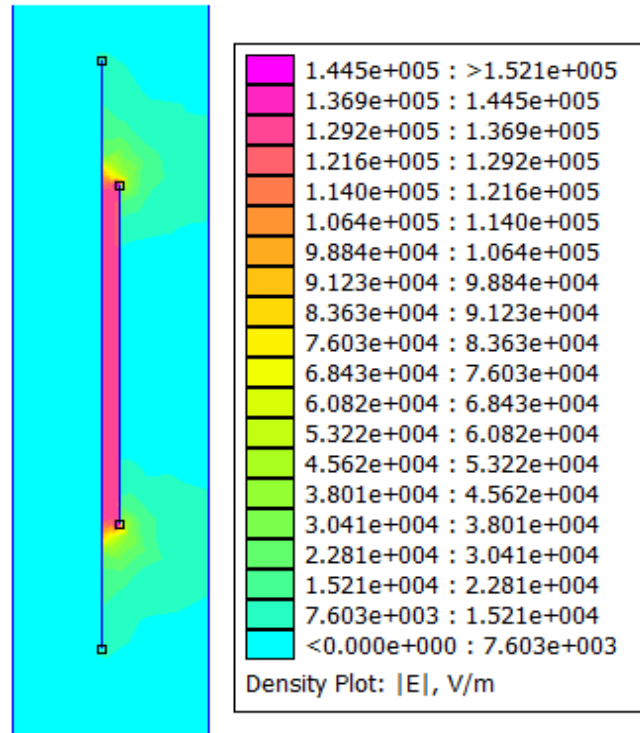


Рисунок 3.5 Розподіл напруженості електричного поля між першим шаром обмотки ВН та електростатичним екраном

Задавши потенціал $\varphi_{1\text{шару}} = 1000$ В на першому шарі обмотки ВН, знайдемо, шляхом вбудованої функції інтегрування, електричний заряд на заземленому електростатичному екрані $q_{\text{екр.}} = 1,745 \cdot 10^{-7}$ Кл. Відповідно ємність ізоляції $C_{\text{із}}$ визначаємо за класичною формулою:

$$C_{\text{із}} = \frac{q_{\text{екр.}}}{\varphi_{1\text{шару}}} = \frac{1,745 \cdot 10^{-7}}{1000} = 1,745 \cdot 10^{-10} = 174,5 \text{ пФ} \quad (3.10)$$

Як бачимо, ємність, обчислена за допомогою програми FEMM на 11,84 пФ більша, або на 6,8 % у відносних величинах.

Розрахунок часткової індуктивності розсіювання L_{iA} та часткової взаємоіндуктивності розсіювання M_{kA} здійснений шляхом моделювання активної частини незаземлюваного ТН у середовищі програми FEMM.

FEMM – це програмний пакет, що призначений для моделювання двовимірних електричних та магнітних полів. Математичною основою FEMM є метод кінцевих елементів, задача якого полягає в знаходженні

єдино-ймовірного електромагнітного поля в заданому розрахунковому просторі при вказаних умовах.

Як вже зауважувалося у розділі [2], реальний переріз обмотки ВН замінено еквівалентними прямокутниками, а переріз ступінчатої фігури стрижня магнітопроводу циліндром, діаметр якого є еквівалентним площі реальної фігури з урахуванням коефіцієнту заповнення сталлю. Довжина ярем додана до довжини стрижня.

Порахуємо еквівалентний діаметр циліндру магнітопроводу. Площа ступінчатої фігури становить $S_c = 2824,65 \text{ мм}^2$.

$$\frac{\pi \cdot d_{\text{екв}}^2}{4} = S_c \cdot k \quad (3.11)$$

$$d_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c \cdot k}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2824,65 \cdot 0,975}{\pi}} = 59,2 \text{ мм} \quad (3.12)$$

Тоді відповідно еквівалентний радіус циліндру магнітопроводу дорівнює $r_{\text{екв}} = \frac{d_{\text{екв}}}{2} = \frac{59,2}{2} = 29,6 \text{ мм}$.

Розміри активної частини незаземлюваного трансформатору напруги у вісесиметричній системі координат представлений на рис.3.6. На рис. 3.6, первинна та вторинна обмотки розбиті на сегменти.

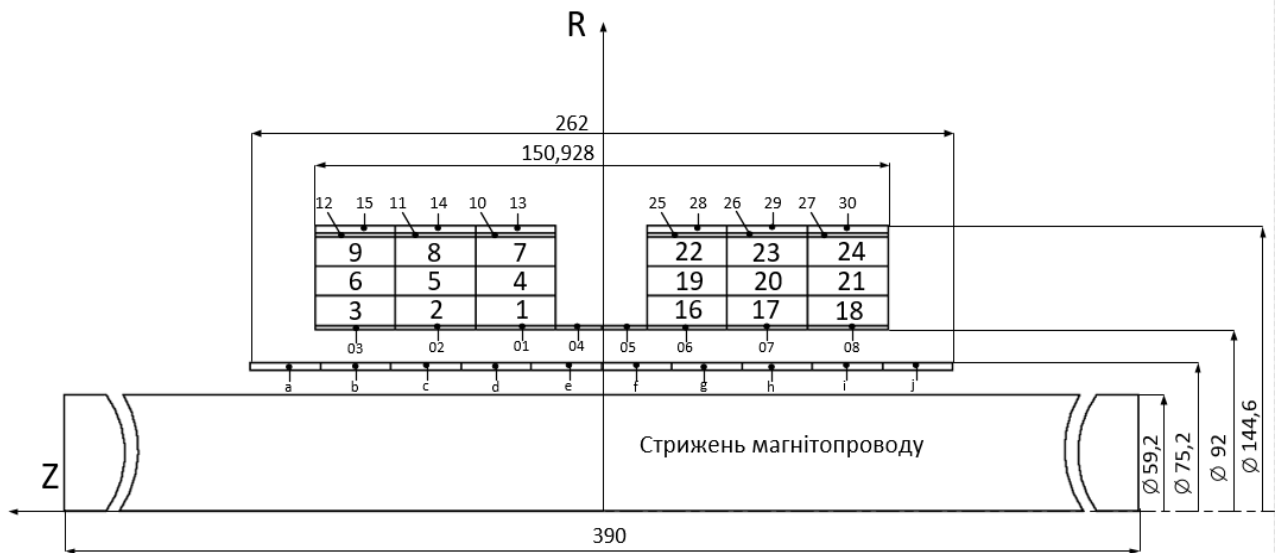


Рисунок 3.6 Розміри активної частини незаземлюваного трансформатора напруги у вісесиметричній системі координат

Змоделюємо активну частину у середовищі програми FEMM [11]. З метою знаходження потоків розсіювання, в геометричний центр кожного з сегментів повинно бути проведено лінії, вздовж яких буде здійснюватися інтегрування вектора індукції.

Задамо границі розрахункової області та значення векторного магнітного потенціалу на цих границях $A_\varphi = 0$, границю $r = 0$ позначимо як вісь симетрії.

Магнітопроводу присвоїмо магнітну проникність $\mu_{\text{ст}} = 5000$, обмоткам $\mu_{\text{мідь}} = 1$.

Як вже зазначалося, якщо наскрізний струм одного витка дорівнює $i_0 = 1$ А, то МРС окремого сегменту дорівнює $I_i = i_0 \cdot W_i$, де W_i – кількість витків в сегменті. Наприклад на рис. 3.6, сегмент номер 5 містить 4086,7 витків, тоді наскрізний струм через переріз цього сегменту дорівнює 4086,7 А.

Кількість витків у сегментах первинної обмотки та наскрізні струми через переріз кожного з сегментів наведений у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Кількість витків у сегментах первинної обмотки та наскрізні струми через переріз кожного з сегментів

Номер сегменту	Витків у сегменті	Струм у сегменті, А	Номер сегменту	Витків у сегменті	Струм у сегменті, А
Обмотка А			Обмотка Б		
Витків в обмотці 37050			Витків в обмотці 37050		
01	28,21	28,21	06	28,21	0,00
02	28,21	28,21	07	28,21	0,00
03	28,21	28,21	08	28,21	0,00
04	16,00	16,00	05	16,00	0,00
1	4086,70	4086,70	16	4086,70	0,00
2	4086,70	4086,70	17	4086,70	0,00
3	4086,70	4086,70	18	4086,70	0,00
4	4086,70	4086,70	19	4086,70	0,00
5	4086,70	4086,70	20	4086,70	0,00
6	4086,70	4086,70	21	4086,70	0,00
7	4086,70	4086,70	22	4086,70	0,00
8	4086,70	4086,70	23	4086,70	0,00
9	4086,70	4086,70	24	4086,70	0,00
10	28,21	28,21	25	28,21	0,00
11	28,21	28,21	26	28,21	0,00
12	28,21	28,21	27	28,21	0,00
13	28,21	28,21	28	28,21	0,00
14	28,21	28,21	29	28,21	0,00
15	28,21	28,21	30	28,21	0,00

Завдяки симетричній конструкції первинної обмотки для вирішення систем рівнянь (2.27-2.32), (2.33-2.38) достатньо знайти величини L_{iA}, M_{kA} . Тому генеруючою обмоткою виступає “обмотка” А, струм “обмотки” Б дорівнює нулю.

Обмотка НН розбита на 10 однакових сегментів. Кількість витків у сегментах вторинної обмотки наведений у табл. 3.4.

Наскрізний струм через вторинну обмотку дорівнює нулю, оскільки для визначення часткової взаємодуктивності розсіювання M_{IA} , яка

еквівалентно дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{IA} , потрібно, щоб струм 1 А протікав по “обмотці” А.

Таблиця 3.4

Кількість витків у сегментах вторинної обмотки

Номер сегменту	Витків у сегменті	Номер сегменту	Витків у сегменті
a	49,40	f	49,40
b	49,40	g	49,40
c	49,40	h	49,40
d	49,40	i	49,40
e	49,40	j	49,40

Активна частина незаземлюваного трансформатора напруги у середовищі програми FEMM представлена на рис. 3.7.

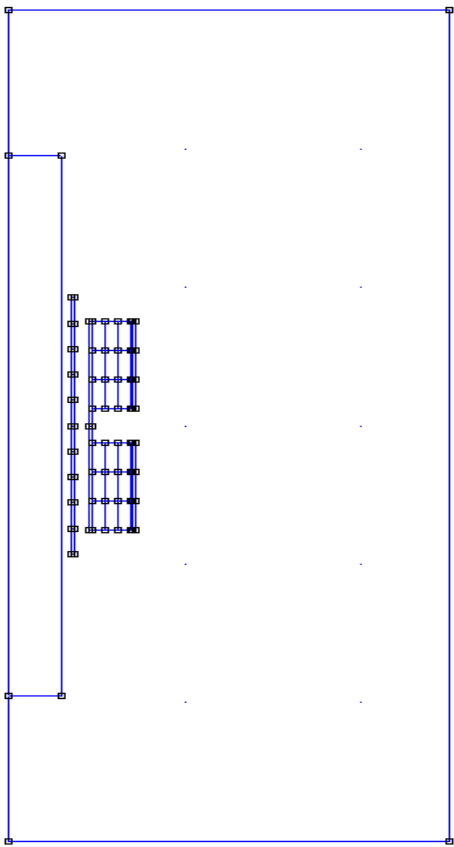


Рисунок 3.7 Активна частина незаземлюваного ТН у середовищі програми FEMM [11]

Виконаємо розрахунок розподілу магнітного поля активної частини незаземлюваного ТН, при протіканні струму 1 А по “обмотці” А, та за нульових значень струму в “обмотці” Б та вторинній обмотці.

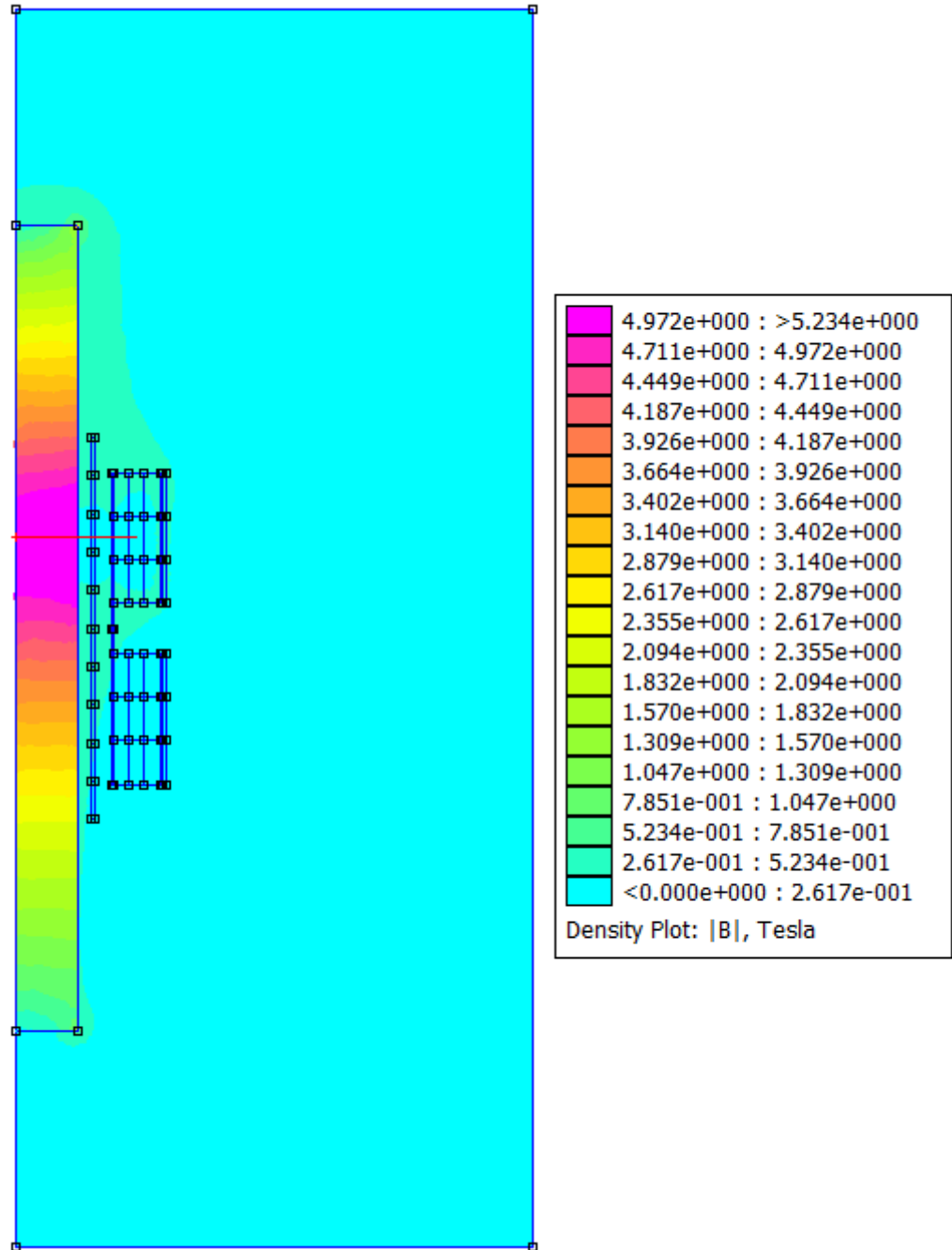


Рисунок 3.8 Розподіл індукції магнітного поля активної частини незаземлюваного ТН при протіканні струму 1 А по “обмотці” А, червоним кольором позначена лінія, що проведена у геометричний центр сегменту номер п’ять

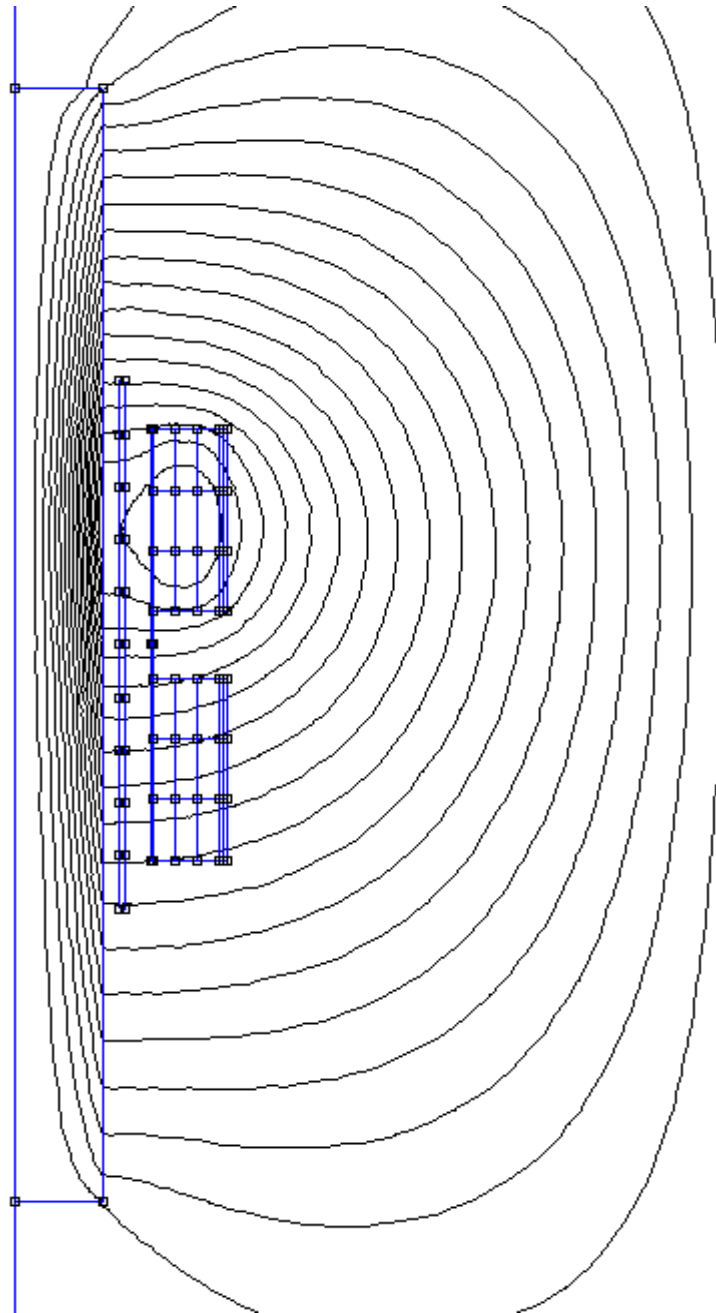


Рисунок 3.9 Розподіл ліній магнітного поля активної частини незаземлюваного ТН при протіканні струму 1 А по “обмотці” А

Результати розрахунку інтегрування вектора магнітної індукції вздовж ліній, що проведені у геометричні центри сегментів первинної обмотки (“обмоток” А, Б) надані у табл. 3.5. На рис 3.8, лінія проведена у сегмент номер 5.

Потоки розсіювання i – го витка кожного сегменту первинної обмотки при протіканні струму 1 А по “обмотці” А

Номер сегменту	$\Phi_{i\text{сегм.А}}$	$\frac{W_{i\text{сегм.А}}}{W_A}$	$\Phi_{i\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{i\text{сегм.А}}}{W_A}$	Номер сегменту	$\Phi_{k\text{сегм.А}}$	$\Phi_{k\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{k\text{сегм.Б}}}{W_B}$
Обмотка А				Обмотка Б		
Витків в обмотці 37050				Витків в обмотці 37050		
01	0,01738	0,00076	0,0000132	06	0,01355	0,0000103
02	0,01787	0,00076	0,0000136	07	0,01198	0,0000091
03	0,01684	0,00076	0,0000128	08	0,01052	0,0000080
04	0,01598	0,00043	0,0000069	05	0,01491	0,0000064
1	0,01760	0,11030	0,0019417	16	0,01353	0,0014927
2	0,01813	0,11030	0,0019997	17	0,01196	0,0013196
3	0,01707	0,11030	0,0018825	18	0,01050	0,0011588
4	0,01776	0,11030	0,0019587	19	0,01346	0,0014852
5	0,01832	0,11030	0,0020209	20	0,01191	0,0013142
6	0,01723	0,11030	0,0019001	21	0,01047	0,0011555
7	0,01749	0,11030	0,0019294	22	0,01047	0,0011555
8	0,01803	0,11030	0,0019891	23	0,01183	0,0013056
9	0,01697	0,11030	0,0018715	24	0,01042	0,0011499
10	0,01704	0,00076	0,0000130	25	0,01321	0,0000101
11	0,01754	0,00076	0,0000134	26	0,01173	0,0000089
12	0,01652	0,00076	0,0000126	27	0,01035	0,0000079
13	0,01692	0,00076	0,0000129	28	0,01321	0,0000101
14	0,01741	0,00076	0,0000133	29	0,01174	0,0000089
15	0,01640	0,00076	0,0000125	30	0,01035	0,0000079

Виходячи з результату розрахунку потоків розсіювання, знайдемо Φ_{iA}, Φ_{kA} .

Магнітний потік розсіювання Φ_{iA} , що є зчепленим i -м витком “обмотки” А при протіканні по “обмотці” А струму 1 А дорівнює:

$$\Phi_{iA} = \sum \Phi_{i\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{i\text{сегм.А}}}{W_A} = 0,01761 \text{ Вб} \quad (3.13)$$

Відповідно при наскрізному струмі 1 А, $L_{iA} = \Phi_{iA} = 0,01761 \text{ Гн}$.

Магнітний потік розсіювання M_{kA} , що є зчепленим з k -м витком “обмотки” Б при протіканні по “обмотці” А струму 1 А:

$$\Phi_{kA} = \sum \Phi_{k\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{k\text{сегм.Б}}}{W_B} = 0,01162 \text{ Вб}. \quad (3.14)$$

Відповідно при наскрізному струмі 1 А, $M_{kA} = \Phi_{kA} = 0,01162$ Гн.

Потоки розсіювання l -го витків сегментів вторинної обмотки при протіканні по “обмотці” А струму 1 А представлені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Потоки розсіювання l –го витка кожного сегменту вторинної обмотки при протіканні по “обмотці” А струму 1 А

Номер сегменту	$\Phi_{l\text{сегм.А}}$	$\frac{W_{l\text{сегм.В2}}}{W_2}$	$\Phi_{l\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{l\text{сегм.В2}}}{W_2}$
a	0,01474	0,1	0,001474
b	0,01648	0,1	0,001648
c	0,01739	0,1	0,001739
d	0,01724	0,1	0,001724
e	0,01615	0,1	0,001615
f	0,01467	0,1	0,001467
g	0,01321	0,1	0,001321
h	0,01185	0,1	0,001185
i	0,01057	0,1	0,001057
j	0,00935	0,1	0,000935

На основі розрахунків табл. 3.6 , знайдемо магнітний потік Φ_{lA} , що є зчепленим l -м витком при протіканні по “обмотці” А струму 1 А:

$$\Phi_{lA} = \sum \Phi_{l\text{сегм.А}} \cdot \frac{W_{l\text{сегм.В2}}}{W_2} = 0,01416 \text{ Вб} \quad (3.15)$$

Відповідно при наскрізному струмі 1 А, $M_{lA} = \Phi_{lA} = 0,01416$ Гн.

Отже, вхідні величини $W_A, R_A, \dot{R}_m, C_{i3}, L_{lA}, M_{kA}$ для систем рівнянь (2.27-2.32), (2.33-2.38) були визначені. Для розрахунку напруги вторинної обмотки було визначено значення M_{lA} .

Висновки до розділу 3

Для систем рівнянь та для визначення напруги вторинної обмотки розраховані вхідні величини $W_A, R_A, \dot{R}_m, C_{i3}, L_{lA}, M_{kA}$ та відповідно W_2, M_{lA} .

Кількість витків первинної W_A та вторинної обмоток W_2 , активний опір первинної обмотки R_A визначені за допомогою загальновідомих формул.

Для знаходження комплексного магнітного опору \dot{R}_m проведено експериментальне визначення вольт-амперної характеристики тестової обмотки трансформатора в широкому діапазоні напруг.

Ємність ізоляції між першим шаром первинної обмотки та екраном, індуктивності та взаємоіндуктивності розсіювання L_{iA}, M_{kA}, M_{lA} визначено за допомогою моделювання у FEMM.

4 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИСОКОВОЛЬТНОГО НЕЗАЗЕМЛЮВАНОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ З УРАХУВАННЯМ МАГНІТНОГО РОЗСІЮВАННЯ

Вхідні величини $W_A, R_A, C_{i3}, L_{iA}, M_{kA}$ будуть незмінними для систем рівнянь (2.27-2.32), (2.33-2.38). Змінюваними величинами будуть $U_{вх}$ та відповідне йому значення \dot{R}_M . Розрахунок будемо виконувати в діапазоні від 10 В до випробувальної напруги ТН, що складає 56250 В.

Наведемо значення $U_{вх}$ та відповідних значень комплексного магнітного опору \dot{R}_M у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення $U_{вх}$ та складові \dot{R}_M для розрахунку системи рівнянь (2.27-2.32), (2.33-2.38)

$\frac{U_s}{U_{Sr}}, \%$	$U_{вх}, \text{В}$	R_M (абсолютне значення)	$\Phi_M, ^\circ$
0,027	10	383549,26	11,966
0,080	30	230949,35	17,878
0,267	100	79878,01	24,467
0,800	300	43646,61	23,996
1,333	500	34689,00	23,732
2,133	800	28050,05	23,482
2,667	1000	26220,60	25,010
5,000	1875	19786,14	29,488
10,000	3750	16032,54	32,111
20,000	7500	13114,71	35,776
50,000	18750	9998,54	41,275
80,000	30000	9585,92	39,766
100,000	37500	10312,92	35,550
120,000	45000	13481,49	26,378
130,000	48750	18095,02	23,457
150,000	56250	32039,44	14,824

У табл. 4.1, $\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}$ – відносні значення вторинної напруги ТН у відсотках.

4.1 Розрахунок фазного та лінійного режимів роботи незаземлюваного ТН з урахуванням магнітного розсіювання

Розв'яжемо систему рівнянь (2.27-2.32) для **фазного** режиму роботи незаземлюваного ТН. Результати розрахунків величин \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_H , \dot{U}_A , \dot{U}_B , Φ представлені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Результати розрахунки системи рівнянь (2.27-2.32) для фазного режиму роботи незаземлюваного ТН

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{вх}, B$	\dot{U}_A		\dot{U}_B		Φ		\dot{I}_A		\dot{I}_B		\dot{I}_H	
		U_A, B	$\varphi_{U_A}, ^\circ$	U_B, B	$\varphi_{U_B}, ^\circ$	$\Phi, B\phi$	$\varphi_\Phi, ^\circ$	I_A, A	$\varphi_{I_A}, ^\circ$	I_B, A	$\varphi_{I_B}, ^\circ$	I_H, A	$\varphi_{I_H}, ^\circ$
0,027	10	4,99	90,024	5,01	89,976	3,74E-07	-1,24	1,80E-06	11,551	2,07E-06	10,024	2,75E-07	179,976
0,08	30	14,97	90,024	15,03	89,976	1,18E-06	-1,270	3,30E-06	18,659	4,09E-06	14,957	8,24E-07	179,976
0,267	100	49,91	90,024	50,09	89,976	4,17E-06	-0,656	3,29E-06	33,526	5,78E-06	18,306	2,75E-06	179,976
0,8	300	149,73	90,024	150,27	89,976	1,27E-05	-0,356	4,05E-06	47,725	1,14E-05	15,279	8,24E-06	179,976
1,33	500	249,55	90,024	250,45	89,976	2,12E-05	-0,281	4,55E-06	60,562	1,65E-05	13,924	1,37E-05	179,976
2,13	800	399,29	90,024	400,71	89,976	3,40E-05	-0,235	5,35E-06	81,902	2,33E-05	13,098	2,20E-05	179,976
2,67	1000	499,11	90,024	500,89	89,976	4,26E-05	-0,223	6,27E-06	91,602	2,80E-05	12,904	2,75E-05	179,976
5	1875	935,83	90,024	939,17	89,976	8,00E-05	-0,202	1,27E-05	124,222	4,56E-05	13,238	5,15E-05	179,976
10	3750	1871,65	90,024	1878,35	89,976	1,60E-04	-0,178	2,87E-05	140,265	8,29E-05	12,755	1,03E-04	179,976
20	7500	3743,31	90,024	3756,69	89,976	3,21E-04	-0,162	6,58E-05	149,794	1,53E-04	12,482	2,06E-04	179,976
50	18750	9358,27	90,024	9391,73	89,976	8,03E-04	-0,141	1,90E-04	157,932	3,46E-04	11,847	5,15E-04	179,976
80	30000	14973,23	90,024	15026,77	89,976	1,28E-03	-0,131	3,03E-04	159,492	5,50E-04	11,093	8,24E-04	179,976
100	37500	18716,54	90,024	18783,46	89,976	1,61E-03	-0,127	3,57E-04	158,717	7,09E-04	10,506	1,03E-03	179,976
120	45000	22459,85	90,024	22540,15	89,976	1,92E-03	-0,123	3,41E-04	152,979	9,44E-04	9,419	1,24E-03	179,976
130	48750	24331,51	90,024	24418,50	89,976	2,08E-03	-0,145	2,86E-04	135,196	1,15E-03	10,025	1,34E-03	179,976
150	56250	28074,81	90,024	28175,19	89,976	2,39E-03	-0,152	3,45E-04	49,326	1,79E-03	8,386	1,54E-03	179,976

На основі даних табл.4.2, розрахуємо напругу вторинної обмотки \dot{U}_S за формулою для 100 % відносного значення вторинної напруги ТН (2.40):

$$\dot{U}_S = j \cdot 314 \cdot (1,61 \cdot 10^3 \cdot e^{-0,127j} \cdot 494 + 0,01416 \cdot (3,57 \cdot 10^4 \cdot e^{158,717j} + 7,09 \cdot 10^4 \cdot e^{10,56j})) = 249,9481 e^{90,0042j}.$$

Знайдемо похибку коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$, та кутову похибку $\Delta\varphi, ^\circ$:

$$\varepsilon = \frac{249,9481 \cdot 150 - 37500}{37500} \cdot 100 = -0,0208 \%$$

$$\Delta\varphi = (90,0042 - 90) \cdot 60 = 0,25 ^\circ$$

Розраховані значення напруг вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ для всіх інших $\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}$ при **фазному** режимі роботи ТН надані у вигляді табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Значення напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ для фазного режиму роботи ТН

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{Si}, \text{В}$	U_S		$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$
		$U_S, \text{В}$	$\varphi_{U_S}, ^\circ$		
0,027	0,067	0,0663	90,2879	-0,5111	17,27
0,080	0,2	0,1993	90,1627	-0,3564	9,76
0,267	0,67	0,6657	90,0495	-0,1424	2,97
0,800	2	1,9984	90,0275	-0,0787	1,65
1,333	3,33	3,3312	90,022	-0,0627	1,32
2,133	5,33	5,3306	90,0175	-0,0512	1,05
2,667	6,67	6,6635	90,016	-0,0477	0,96
5,000	12,5	12,4953	90,0105	-0,0380	0,63
10,000	25	24,9921	90,0077	-0,0315	0,46
20,000	50	49,9868	90,0053	-0,0264	0,32
50,000	125	124,9741	90,0029	-0,0207	0,18
80,000	200	199,9605	90,0031	-0,0198	0,19
100,000	250	249,9481	90,0042	-0,0208	0,25
120,000	300	299,9243	90,0079	-0,0252	0,48
130,000	325	324,8933	90,0116	-0,0328	0,70
150,000	375	374,8062	90,0252	-0,0517	1,51

Розрахунки показують, що при 10 В первинної напруги, похибка коефіцієнту масштабного перетворення напруги дорівнює -0,5111 %, а кутова похибка складає 17,27', що не задовольняє вимогі, потрібній для здатності повірки ТН для захисту класом напруги $\frac{1}{\sqrt{3}}$ кВ, класом точності 3, при відносному значенні напруги вторинної обмотки ТН 2 %.

В діапазоні від 2,667 % до 130 % похибка коефіцієнту масштабного перетворення напруги є меншою за абсолютним значенням 0,05 %.

Залежність похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ від відносного значення напруги вторинної обмотки ТН при фазному режимі роботи зображені на рис. 4.1 та рис. 4.2.

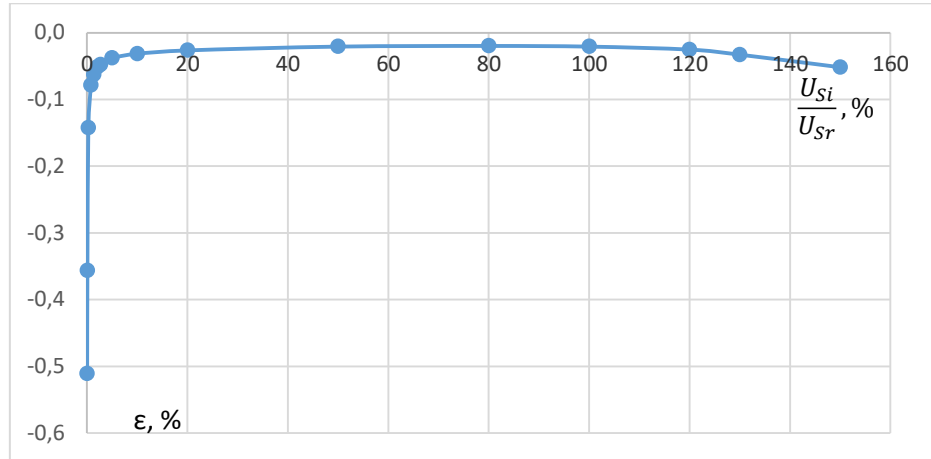


Рисунок 4.1 Залежність похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\epsilon, \%$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,027 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН

Для більшої наглядності деякі залежності будемо додатково відображати в обраних діапазонах.

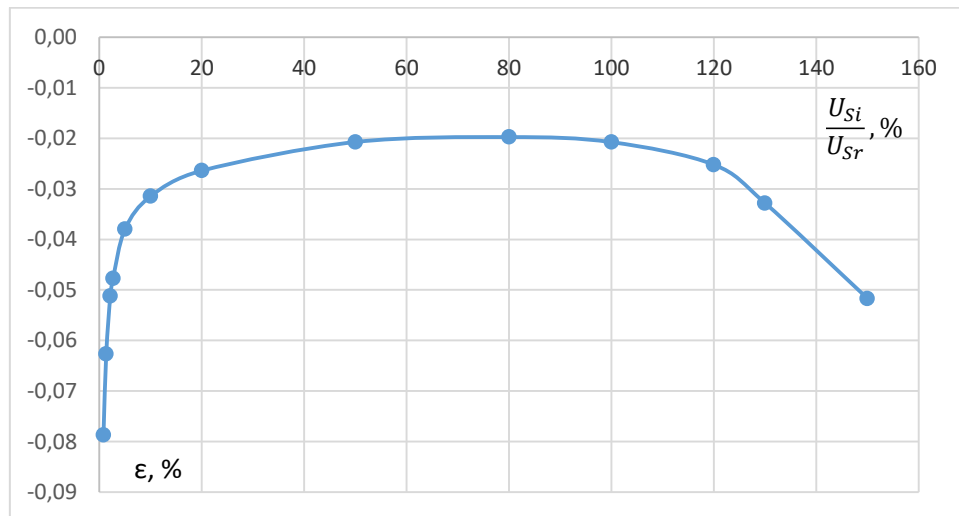


Рисунок 4.1.1 Залежність похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\epsilon, \%$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,8 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН

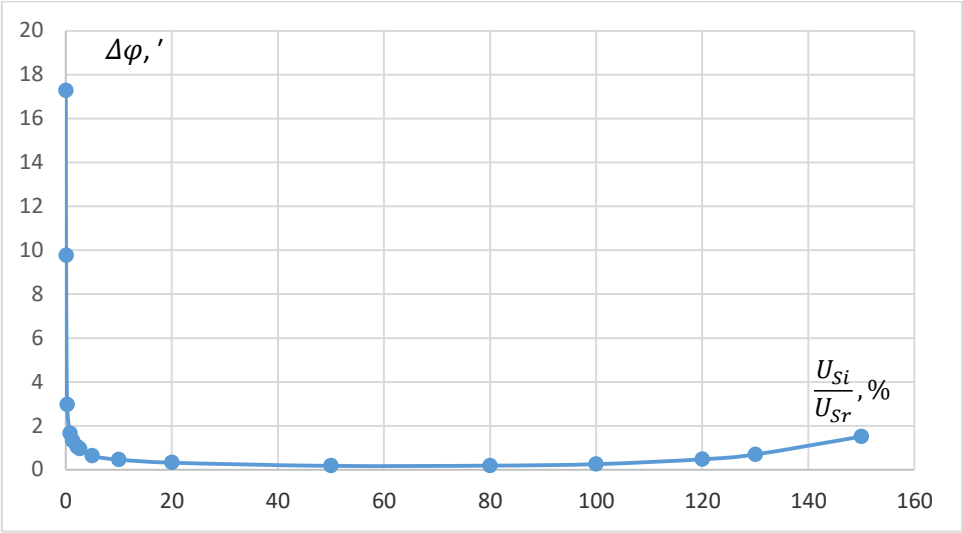


Рисунок 4.2 Залежність кутової похибки $\Delta\varphi, '$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,027 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН

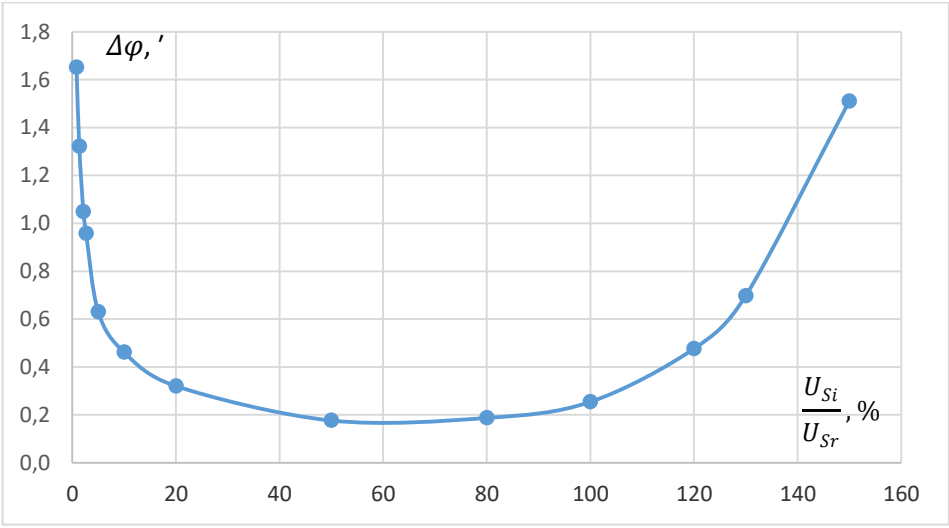


Рисунок 4.2.1 Залежність кутової похибки $\Delta\varphi, '$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,8 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН

Розв'яжемо систему рівнянь (2.33-2.38) для **лінійного** режиму роботи незаземлюваного ТН. Результати розрахунків величин $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_N, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \Phi$ представлені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результати розрахунки системи рівнянь (2.33-2.38) для лінійного режиму роботи незаземлюваного ТН

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{вх}, В$	\vec{U}_A		\vec{U}_B		$\vec{\Phi}$		\vec{I}_A		\vec{I}_B		\vec{I}_H	
		$U_A, В$	$\varphi_{U_A}, ^\circ$	$U_B, В$	$\varphi_{U_B}, ^\circ$	$\Phi, Вб$	$\varphi_\Phi, ^\circ$	$I_A, А$	$\varphi_{I_A}, ^\circ$	$I_B, А$	$\varphi_{I_B}, ^\circ$	$I_H, А$	$\varphi_{I_H}, ^\circ$
0,027	10	5,00	89,937	5,00	90,063	3,74E-07	-1,24	1,92E-06	8,415	1,95E-06	13,019	1,58E-07	-90,000
0,08	30	15,00	89,937	15,00	90,063	1,18E-06	-1,270	3,63E-06	13,017	3,77E-06	20,073	4,75E-07	-90,000
0,267	100	49,99	89,937	50,01	90,063	4,17E-06	-0,656	4,24E-06	13,987	4,87E-06	32,359	1,58E-06	-90,000
0,8	300	149,96	89,937	150,04	90,063	1,27E-05	-0,356	6,87E-06	5,203	8,70E-06	38,117	4,75E-06	-90,000
1,33	500	249,94	89,937	250,06	90,063	2,12E-05	-0,281	9,10E-06	0,034	1,21E-05	41,017	7,91E-06	-90,000
2,13	800	399,90	89,937	400,10	90,063	3,40E-05	-0,235	1,18E-05	-5,056	1,65E-05	44,713	1,27E-05	-90,000
2,67	1000	499,88	89,937	500,12	90,063	4,26E-05	-0,223	1,37E-05	-6,962	1,96E-05	46,268	1,58E-05	-90,000
5	1875	937,28	89,937	937,73	90,063	8,00E-05	-0,202	1,91E-05	-13,246	3,14E-05	53,617	2,97E-05	-90,000
10	3750	1874,55	89,937	1875,45	90,063	1,60E-04	-0,178	3,15E-05	-21,081	5,63E-05	58,509	5,93E-05	-90,000
20	7500	3749,10	89,937	3750,90	90,063	3,21E-04	-0,162	5,31E-05	-29,678	1,03E-04	63,466	1,19E-04	-90,000
50	18750	9372,76	89,937	9377,26	90,063	8,03E-04	-0,141	1,12E-04	-43,417	2,34E-04	69,631	2,97E-04	-90,000
80	30000	14996,41	89,937	15003,61	90,063	1,28E-03	-0,131	1,83E-04	-45,740	3,66E-04	69,559	4,75E-04	-90,000
100	37500	18745,51	89,937	18754,51	90,063	1,61E-03	-0,127	2,47E-04	-42,580	4,63E-04	66,873	5,93E-04	-90,000
120	45000	22494,61	89,937	22505,41	90,063	1,92E-03	-0,123	3,73E-04	-32,670	6,00E-04	58,438	7,12E-04	-90,000
130	48750	24369,16	89,937	24380,87	90,063	2,08E-03	-0,145	5,02E-04	-21,587	7,50E-04	51,510	7,71E-04	-90,000
150	56250	28118,27	89,937	28131,77	90,063	2,39E-03	-0,152	1,01E-03	-10,451	1,22E-03	35,310	8,90E-04	-90,000

Розраховані значення напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ від $\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}$ при лінійному режимі роботи ТН надані у вигляді табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Значення напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ для лінійного режиму роботи незаземлюваного ТН

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{Si}, В$	U_S		$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$
		$U_S, В$	$\varphi_{U_S}, ^\circ$		
0,027	0,067	0,0663	90,2879	-0,5111	17,27
0,080	0,2	0,1993	90,1627	-0,3564	9,76
0,267	0,67	0,6657	90,0495	-0,1424	2,97
0,800	2	1,9984	90,0275	-0,0787	1,65
1,333	3,33	3,3312	90,022	-0,0627	1,32
2,133	5,33	5,3306	90,0175	-0,0512	1,05
2,667	6,67	6,6635	90,016	-0,0477	0,96
5,000	12,5	12,4953	90,0105	-0,0380	0,63
10,000	25	24,9921	90,0077	-0,0315	0,46
20,000	50	49,9868	90,0053	-0,0264	0,32
50,000	125	124,9741	90,0029	-0,0207	0,18
80,000	200	199,9605	90,0031	-0,0198	0,19
100,000	250	249,9481	90,0042	-0,0208	0,25
120,000	300	299,9243	90,0079	-0,0252	0,48
130,000	325	324,8933	90,0116	-0,0328	0,70
150,000	375	374,8062	90,0252	-0,0517	1,51

Як слідує, з табл. 4.3, 4.5, для фазного та лінійного режимів роботи ТН, розраховане значення напруги вторинної обмотки ТН, а відповідно і похибок є однаковими. Це пояснюється тим, що, складова $\dot{I}_A + \dot{I}_B$ у формулі для визначення вторинної напруги, і при фазному і при лінійному режимах роботи ТН залишається постійною, хоча окремо \dot{I}_A та \dot{I}_B для обох режимів є різними.

4.2 Порівняння фазного режиму роботи незаземлюваного ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання

Розв'яжемо систему рівнянь (2.27-2.32) для фазного режиму роботи незаземлюваного ТН без урахування магнітного розсіювання, для цього приймаємо $L_{iA} = M_{kA} = 0$, а для формули визначення напруги вторинної обмотки $M_{iA} = 0$. Результати розрахунків величин $I_A, I_B, I_H, U_A, U_B, \Phi$ представлені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Результати розрахунки системи рівнянь (2.27-2.32) для фазного режиму роботи незаземлюваного ТН без урахування магнітного розсіювання

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{вх}, В$	U_A		U_B		Φ		I_A		I_B		I_H	
		$U_A, В$	$\varphi_{U_A}, ^\circ$	$U_B, В$	$\varphi_{U_B}, ^\circ$	$\Phi, Вб$	$\varphi_\Phi, ^\circ$	$I_A, А$	$\varphi_{I_A}, ^\circ$	$I_B, А$	$\varphi_{I_B}, ^\circ$	$I_H, А$	$\varphi_{I_H}, ^\circ$
0,027	10	5,00	90,024	5,00	89,976	4,29E-07	0,377	2,09E-06	13,154	2,35E-06	11,633	2,74E-07	179,976
0,08	30	15,00	90,024	15,00	89,976	1,29E-06	0,221	3,62E-06	20,124	4,40E-06	16,437	8,22E-07	179,976
0,267	100	50,00	90,024	50,00	89,976	4,29E-06	0,073	3,43E-06	34,108	5,90E-06	19,003	2,74E-06	179,976
0,8	300	150,00	90,024	150,00	89,976	1,29E-05	0,040	4,19E-06	47,644	1,15E-05	15,634	8,22E-06	179,976
1,33	500	250,00	90,024	250,00	89,976	2,15E-05	0,032	4,69E-06	60,043	1,66E-05	14,194	1,37E-05	179,976
2,13	800	400,00	90,024	400,00	89,976	3,44E-05	0,026	5,47E-06	80,869	2,34E-05	13,313	2,19E-05	179,976
2,67	1000	500,00	90,024	500,00	89,976	4,29E-05	0,024	6,38E-06	90,450	2,81E-05	13,103	2,74E-05	179,976
5	1875	937,50	90,024	937,50	89,976	8,05E-05	0,017	1,27E-05	123,354	4,57E-05	13,402	5,14E-05	179,976
10	3750	1875,00	90,024	1875,00	89,976	1,61E-04	0,014	2,87E-05	139,714	8,30E-05	12,888	1,03E-04	179,976
20	7500	3750,00	90,024	3750,00	89,976	3,22E-04	0,011	6,57E-05	149,457	1,53E-04	12,592	2,06E-04	179,976
50	18750	9375,00	90,024	9375,00	89,976	8,05E-04	0,008	1,89E-04	157,751	3,46E-04	11,931	5,14E-04	179,976
80	30000	15000,00	90,024	15000,00	89,976	1,29E-03	0,007	3,03E-04	159,323	5,50E-04	11,170	8,22E-04	179,976
100	37500	18750,00	90,024	18750,00	89,976	1,61E-03	0,008	3,56E-04	158,514	7,08E-04	10,585	1,03E-03	179,976
120	45000	22500,01	90,024	22500,00	89,976	1,93E-03	0,012	3,40E-04	152,580	9,45E-04	9,508	1,23E-03	179,976
130	48750	24375,01	90,024	24375,00	89,976	2,09E-03	0,017	2,85E-04	134,286	1,16E-03	10,144	1,34E-03	179,976
150	56250	28125,01	90,024	28125,00	89,976	2,42E-03	0,031	3,58E-04	48,441	1,80E-03	8,542	1,54E-03	179,976

Розраховані значення напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ від $\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}$ при фазному режимі роботи ТН без урахування магнітного розсіювання надані у вигляді табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Значення напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ при фазному режимі роботи ТН без урахування магнітного розсіювання

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$U_{Si}, \text{В}$	\vec{U}_S		$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$
		$U_S, \text{В}$	$\varphi_{U_S}, ^\circ$		
0,027	0,067	0,06657	90,37748	-0,1418	22,65
0,080	0,200	0,19975	90,22116	-0,1253	13,27
0,267	0,667	0,66628	90,0732	-0,0582	4,39
0,800	2,000	1,99938	90,04017	-0,0312	2,41
1,333	3,333	3,33251	90,03197	-0,0246	1,92
2,133	5,333	5,33224	90,02571	-0,0205	1,54
2,667	6,667	6,66538	90,02374	-0,0193	1,42
5,000	12,500	12,4979	90,01735	-0,0171	1,04
10,000	25,000	24,9963	90,01368	-0,0150	0,82
20,000	50,000	49,9933	90,01071	-0,0135	0,64
50,000	125,000	124,986	90,00756	-0,0116	0,45
80,000	200,000	199,978	90,00742	-0,0108	0,45
100,000	250,000	249,974	90,00845	-0,0105	0,51
120,000	300,000	299,968	90,01217	-0,0105	0,73
130,000	325,000	324,959	90,01673	-0,0127	1,00
150,000	375,000	374,946	90,03116	-0,0144	1,87

З табл. 4.7 слідує, що значення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ без урахування магнітного розсіювання є меншими за абсолютним значенням, ніж похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги при урахуванні магнітного розсіювання для всіх $\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}$.

Наведемо залежності похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, ^\circ$ від відносного значення напруги вторинної обмотки ТН при фазному режимі роботи з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання на рис. 4.3 та рис. 4.4.

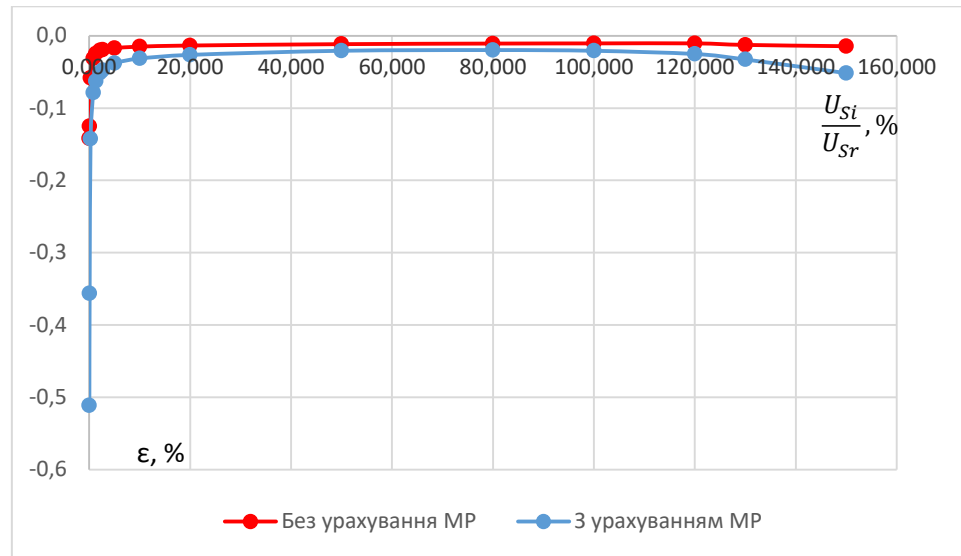


Рисунок 4.3 Порівняльний графік залежності похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\epsilon, \%$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,027 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання

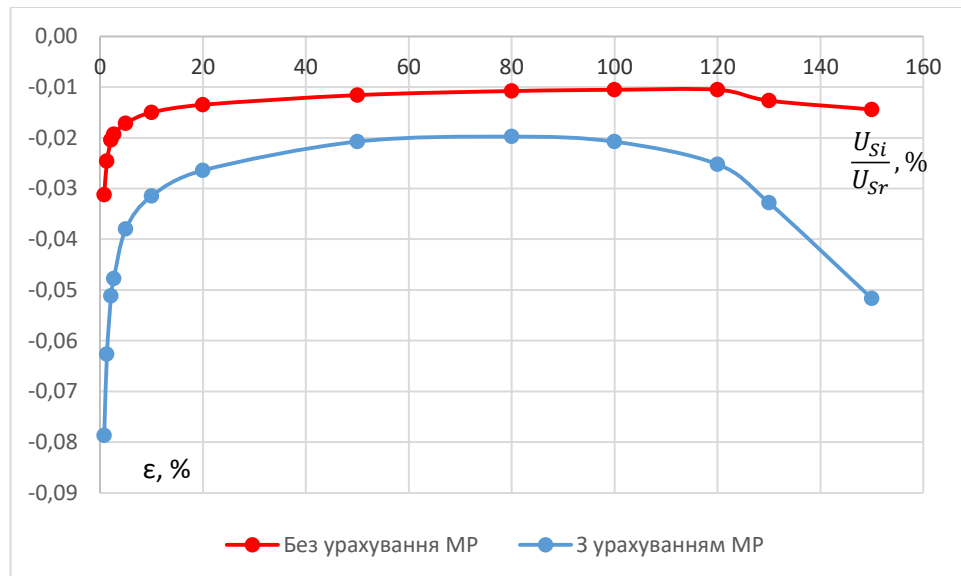


Рисунок 4.3.1 Порівняльний графік залежності похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\epsilon, \%$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,08 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання

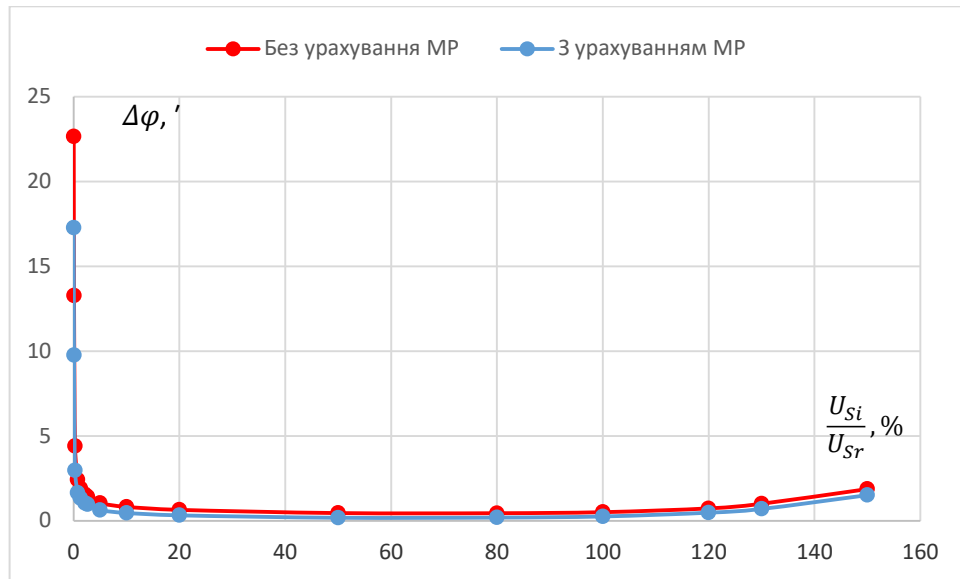


Рисунок 4.4 Залежність кутової похибки $\Delta\varphi, '$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,027 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання

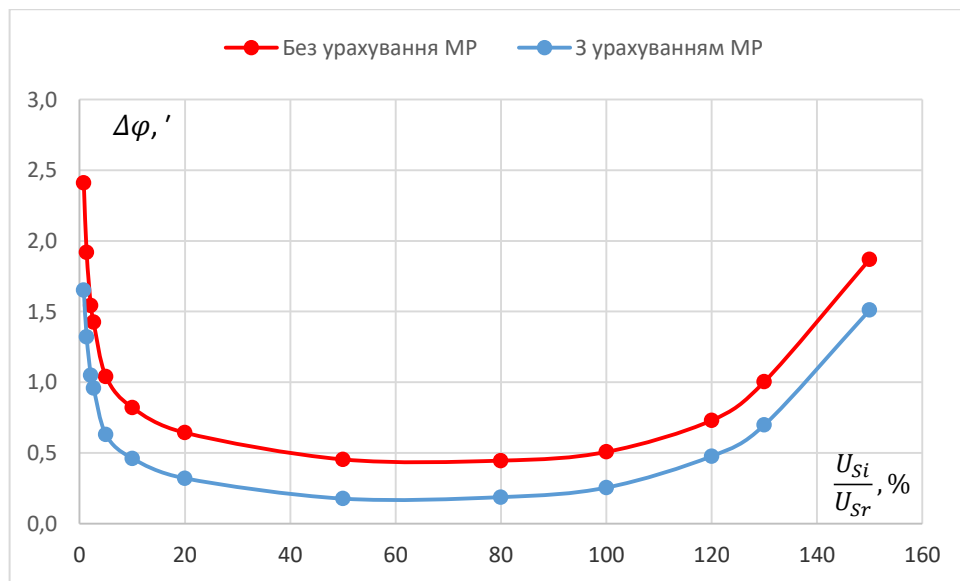


Рисунок 4.4.1 Залежність кутової похибки $\Delta\varphi, '$ від відносного значення напруги вторинної обмотки в діапазоні від 0,8 % до 150 % при фазному режимі роботи ТН з урахуванням та без урахування магнітного розсіювання

Розрахуємо похибку визначення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$, $f(\varepsilon, \%), \%$ та кутової похибки $\Delta\varphi, '$, $f(\Delta\varphi, '), \%$ без урахування магнітного розсіювання відносно відповідних похибок з урахуванням магнітного розсіювання. Результати у табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Похибка визначення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги ε , %, $f(\varepsilon, \%)$, % та кутової похибки $\Delta\varphi$, ', $f(\Delta\varphi, ')$, % без урахування магнітного розсіювання відносно відповідних похибок з урахуванням магнітного розсіювання

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	$f(\varepsilon, \%), \%$	$f(\Delta\varphi, '), \%$
0,027	260,31	31,11
0,080	184,48	35,92
0,267	144,51	47,84
0,800	151,92	45,89
1,333	154,42	45,16
2,133	150,19	47,17
2,667	147,00	48,71
5,000	121,71	65,28
10,000	109,96	77,87
20,000	96,00	100,81
50,000	79,01	157,20
80,000	83,37	137,95
100,000	97,04	99,30
120,000	139,53	53,20
130,000	158,95	43,88
150,000	258,52	23,77

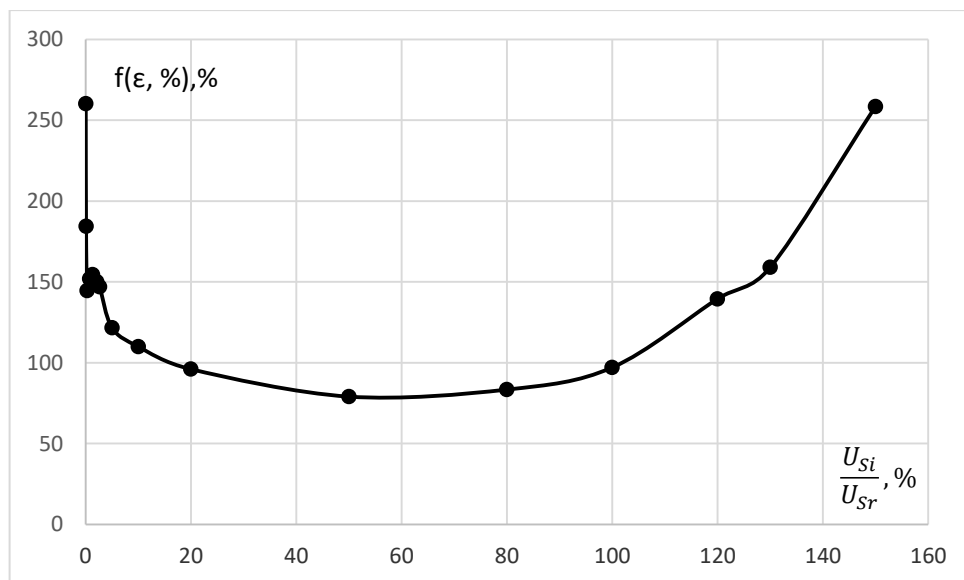


Рисунок 4.5 Залежність похибки визначення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги без урахування магнітного розсіювання відносно відповідних похибок з урахуванням магнітного розсіювання

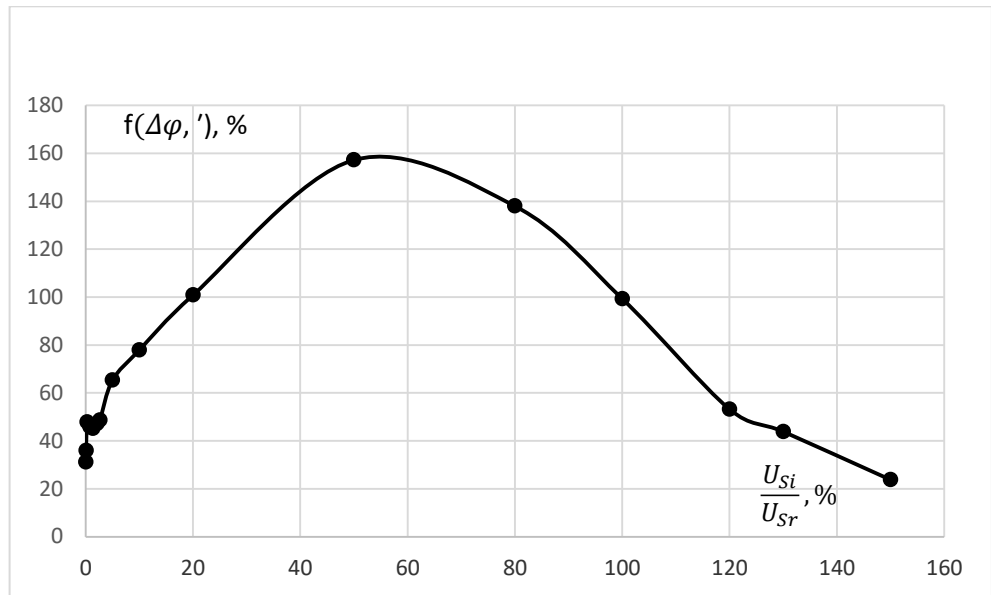


Рисунок 4.6 Залежність похибки визначення кутової похибки без урахування магнітного розсіювання відносно відповідних похибок з урахуванням магнітного розсіювання

Дані з табл. 4.8 та графіків 4.5, 4.6 показують, що магнітне розсіювання має дуже вагомий вплив на визначення похибок ТН, а відповідно на всі його характеристики.

В діапазонах малих відносних напруг, похибка визначення похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги складає може сягати більше 200 %, в діапазоні близьких до номінальної напруги – 80-100 %. Загалом, похибка при малих та великих значеннях відносної напруги має максимуму, та мінімум у діапазоні напруг, близьких до номіналу.

Похибка визначення кутової похибки, навпаки при близьких до номінальної напруги значень складає 90-140 %, що відповідає максимуму, та спадає у діапазоні малих та великих значень відносної напруги.

4.3 Корекція витків первинної обмотки незаземлюваного ТН

З метою підвищення класу точності ТН, виконують корекцію витків або підлаштування. Корекцію витків можна виконувати на стадії проектування ТН, підлаштування можна здійснювати шляхом під'єднання додаткових підлаштувальних трансформаторів до вторинної обмотки ТН.

За результатами розрахунку значень вторинної напруги ТН, похибка визначення коефіцієнту масштабного перетворення напруги є від'ємною у всьому діапазоні напруг.

Для збільшення значення вторинної напруги, можна збільшувати кількість витків вторинної обмотки, але для більш точної корекції, зменшують кількість витків первинної обмотки.

З огляду на вище сказане, будемо зменшувати кількість витків первинної обмотки до такої кількості витків, коли похибка визначення коефіцієнту масштабного перетворення напруги за абсолютною величиною, у діапазоні близьких до номінальної напруги, буде найменшою.

Результати розрахунків значень напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги ε , % та кутової похибки $\Delta\varphi$, ' будемо надавати у вигляді порівняльної таблиці для кожного кроку корекції.

Таблиця 4.9

Порівняльна таблиця значень напруги вторинної обмотки, похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги ε , % та кутової похибки $\Delta\varphi$, ' для різної кількості витків первинної обмотки.

$\frac{U_{Si}}{U_{Sr}}, \%$	U_{Bx}, B	U_{Si}, B	$W_1 = 74100$		$W_1 = 74090$		$W_1 = 74086$		$W_1 = 74084$	
			$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$\Delta\varphi, ^\circ$
0,027	10	0,067	-0,5111	17,27	-0,4977	17,27	-0,4924	17,28	-0,4897	17,28
0,08	30	0,2	-0,3564	9,76	-0,3429	9,76	-0,3376	9,77	-0,3349	9,77
0,267	100	0,67	-0,1424	2,97	-0,1289	2,97	-0,1235	2,97	-0,1208	2,97
0,8	300	2	-0,0787	1,65	-0,0652	1,65	-0,0598	1,65	-0,0571	1,65
1,33	500	3,33	-0,0627	1,32	-0,0492	1,32	-0,0438	1,32	-0,0411	1,32
2,13	800	5,33	-0,0512	1,05	-0,0377	1,05	-0,0323	1,05	-0,0296	1,05
2,67	1000	6,67	-0,0477	0,96	-0,0342	0,96	-0,0289	0,96	-0,0262	0,96
5	1875	12,5	-0,0380	0,63	-0,0245	0,63	-0,0191	0,63	-0,0164	0,63
10	3750	25	-0,0315	0,46	-0,0180	0,46	-0,0126	0,46	-0,0099	0,46
20	7500	50	-0,0264	0,32	-0,0129	0,32	-0,0075	0,32	-0,0048	0,32
50	18750	125	-0,0207	0,18	-0,0073	0,18	-0,0019	0,18	0,0008	0,18
80	30000	200	-0,0198	0,19	-0,0063	0,19	-0,0009	0,19	0,0018	0,19
100	37500	250	-0,0208	0,25	-0,0073	0,25	-0,0019	0,25	0,0008	0,25
120	45000	300	-0,0252	0,48	-0,0117	0,48	-0,0063	0,48	-0,0036	0,48
130	48750	325	-0,0328	0,70	-0,0193	0,70	-0,0139	0,70	-0,0112	0,70
150	56250	375	-0,0517	1,51	-0,0382	1,51	-0,0328	1,51	-0,0301	1,51

Спочатку кількість витків була зменшена на 10, потім крок зміни витків був зменшений. З результатів табл. 4.9, найменше абсолютне значення похибок коефіцієнту масштабного перетворення було досягнуто при зміні кількості витків первинної обмотки до 74084. Похибка визначення напруги при такій кількості витків стає вже додатною, та, наприклад, для 100 % відносної напруги становить 0,0008 %.

Помітним є те, що зміна кількості витків первинної обмотки ТН ніяк не впливає на значення кутової похибки.

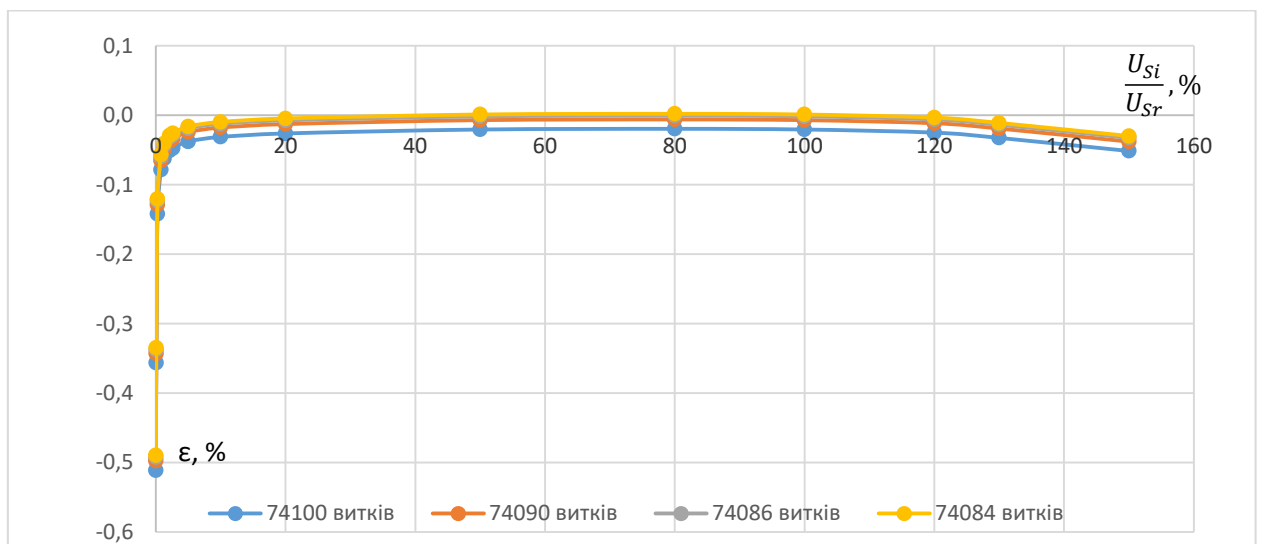


Рисунок 4.7 Порівняльний графік значень похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\varepsilon, \%$ в діапазоні відносних напруг від 0,027 % до 150 % для різної кількості витків

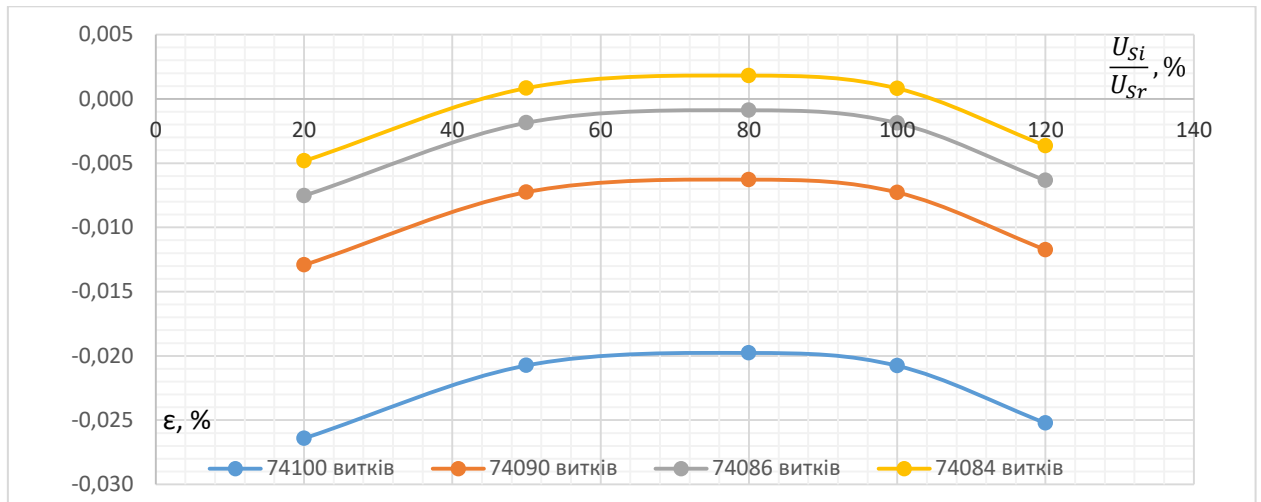


Рисунок 4.7.1 Порівняльний графік значень похибки коефіцієнту масштабного перетворення напруги $\epsilon, \%$ в діапазоні відносних напруг від 20 % до 120 % для різної кількості витків

У діапазоні від 20 % до 120 % відносної напруги, абсолютне значення похибки визначення коефіцієнту масштабного перетворення менше, ніж 0,005 %, а абсолютне значення кутової похибки є меншим, ніж 0,5 '.

Тобто ТН може мати границі допустимої похибки визначення коефіцієнту масштабного перетворення $\pm 0,005 \%$ та визначення кута $\pm 0,5'$ в діапазоні робочих напруг від 20 % до 120 %, що є ширшим діапазоном, ніж відомі трансформатори напруги NVRD.

Висновки до розділу 4

Проведено розрахунок фазного та лінійного режимів напруг незаземлюваного ТН. Виявлено, що похибка визначення коефіцієнту масштабного перетворення напруги та кутова похибка для обох режимів є однаковими. Пояснюється це тим, що сума струмів $\dot{I}_A + \dot{I}_B$ залишається величиною постійною.

Показано, що неврахування магнітного розсіювання на стадії проектування ТН, може призвести до того, що очікувані похибки визначення

коефіцієнту масштабного перетворення напруги та кутової похибки можуть відрізнятися в 2-3 рази.

З метою підвищення класу точності, здійснено корекцію витків первинної обмотки, і досягнуто класу точності $\pm 0,005 \%$ для визначення коефіцієнту масштабного перетворення та $\pm 0,5'$ для визначення кута у діапазоні відносних напруг від 20 % до 120 %.

5. СТАРТАП-ПРОЕКТ

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап-проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

5.1 Опис ідеї проекту

Впровадити Перетворювач високовольтний 45 кВ, основним елементом якого є **високовольтний незаземлюваний трансформатори напруги**, до складу Установки повірочної трансформаторів напруги СА7400, СА7400М1, що дасть змогу повіряти не тільки однофазні, а і трифазні трансформатори напруги.

На разі, до складу УПТН СА7400, СА7400М1 входять високовольтні вимірювальні конденсатори 45 кВ, 100 кВ, 230 кВ (залежить від бажання клієнта).

Таблиця 5.1

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження ПВ-45, основним елементом якого є незаземлюваний ТН, до складу УПТН СА7400, СА7400М1	Метрологічна повірка однофазних та трифазних ТН та інших масштабних перетворювачів напруги	Можливість повірки не тільки однофазних, а і трифазних ТН до 45 кВ

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників

для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	КГИ-45	НОЛ-35			
1.	Собівартість	низька	висока	середня			Найнижча собівартість серед конкурентів
2.	Продажна вартість	висока	середня	середня			Найвища продажна вартість
3.	Надійність	надійний	менш надійний	надійний			Є надійним
4.	Обслуговування	простий	менш простий	простий			Простий в обслуговуванні
5.	Точність вимірювання	висока	найвища	середня		Має меншу точність, ніж КГИ-45	

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Впровадження ПВ-45, основним елементом якого є незаземлюваний ТН, до складу УПТН СА7400, СА7400М1	Розгортання виготовлення здійснюється на фірмі “ОЛТЕСТ”	Доступні всі технології, необхідні для виготовлення.	Автор проекту (розробник) веде безпосередній контроль процесу виготовлення, надаючи документацію та необхідні консультації
<u>Обрана технологія реалізації ідеї проекту:</u> Розгортання виготовлення здійснюється на фірмі “ОЛТЕСТ”				

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: так чи ні, а також технологічного шляху, яким це доцільно зробити (з поміж названих технологій обираються такі, що доступні авторам проекту та є наявними на ринку).

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	8000 \$
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Проводиться 1 раз на три роки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20 %

Середня норма рентабельності проекту більша за середній банківський відсоток на вкладення, тому ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
---	--------------------------	--	---	-----------------------------

Продовження таблиці 5.5

Потреба метрологічної повірки трифазних ТН	<ul style="list-style-type: none"> - Метрологічні центри - Виробники вимірювальних трансформаторів - Організації, що експлуатують ТН 	<ul style="list-style-type: none"> - Необхідність повірки однофазних і трифазних ТН - Необхідність повірки тільки однофазних ТН - Необхідність повірки ТН, класом напруги вище 45 кВ 	Відповідність характеристикам, що зазначені у сертифікаті та в описі типу.
--	---	---	--

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 5.6-7). Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Неусвідомленість споживачів	Неусвідомленість користі товару, ризики споживача	Донесення інформації через сайт у вигляді реклами, відео. Влаштування конференцій, виставок
2	Поява конкурентів	Зменшення долі ринку	Вдосконалення та модернізація, розробка додаткових можливостей товару

Таблиця 5.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Збільшення попиту, поява нових клієнтів	Завдяки можливості повірки трифазних ТН	Забезпечення тісного контакту з споживачами, гарантійне обслуговування, пропозиції щодо інших товарів.

Проведений аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку описані в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	олігополія	-
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/..	ринок країн СНГ та Європейського Союзу	Донесення інформації через сайт у вигляді реклами, відео. Влаштування конференцій, виставок.
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	внутрішньогалузева	-
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Між бажанням	-
5. За характером конкурентних переваг - Цінова / нецінова	нецінова	-
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	марочна	-

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Незаземлювані ТН виробляють багато фірм, ПВ-45 є першопрохідцем	Немає бар'єрів	Не впливають	Вплив споживачів і став поштовхом для ідеї	Не існує
<u>Висновки</u>	Для ПВ-45 конкурентів немає	Можливості виходу на ринок є, конкурентів немає	Ні	Клієнтам потрібна змога повірити трифазні ТН	Обмеження відсутні

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 5.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. № 5.6-7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 5.10

Таблиця 5.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Надійність	Є більш надійним, ніж КГІ-45 із-за вмісту елегазу
2	Вартість	Завдяки можливості трифазних ТН, є дорожчим
3	Собівартість	Собівартість є нижчою, ніж для КГІ-45

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту (табл. 5.11).

Таблиця 5.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18		+					
2	Вартість	20	+						
3	Собівартість	20	+						
4	Точність вимірювань	17							+
5	Сервіс	18	+						

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового

середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 5.12

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: собівартість, вартість, надійність, незначна залежність похибки вимірювання напруги від температури, сервіс	Слабкі сторони: велика маса, присутня залежність похибки визначення напруги від напруги
Можливості: перевірка трифазних трансформаторів напруги	Загрози: неусвідомленість споживачів

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 5.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка	100 %	6 міс.
2	Виготовлення	100 %	3 міс.
3	Випробування	100 %	1 міс.
4	Сертифікація	100 %	6 міс.
5	Вихід на ринок	100 %	1 рік.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Метрологічні центри	так	60%	немає	просто
2	Виробники вимірювальних трансформаторів	так	45%	немає	просто
3	Організації, що експлуатують ТН	так	40%	немає	просто
Які цільові групи обрано: всі три цільові групи є потенційними клієнтами					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) автори ідеї обирають цільові групи, для яких вони пропонуватимуть свій товар, та визначають стратегію охоплення ринку:

1) якщо компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу;

2) якщо працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу – вона використовує стратегію диференційованого маркетингу;

3) якщо компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги) – вона використовує масовий маркетинг.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Стратегія лідерства по витратам	Стратегія диференційованого маркетингу	Надійність, вартість, простота в експлуатації та обслуговуванні	Стратегія лідерства по витратам

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
	Так	Шукати нових	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 5.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 5.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
-------	-------------------------------------	---------------------------	--	--

Продовження таблиці 5.17

	Забезпечення відповідності метрологічних характеристик згідно сертифікату	Стратегія лідерства по витратам	Можливість перевірки трифазних ТН	Низька собівартість, надійність, простота в обслуговуванні
--	---	---------------------------------	-----------------------------------	--

Результатом виконання підрозділу має стати узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії , яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Необхідність перевірки трифазних ТН	Забезпечує цю можливість	Можливість перевірки трифазних ТН, що інші забезпечити не можуть

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Надає можливість перевірки трифазних трансформаторів напруги		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Якість: повинен відповідати всім електротехнічним стандартам, що стосуються трансформаторів напруги та методів перевірки		
	Пакування: повинен мати власну сумку з фірмовим написом,, транспортуватись повинен у фанерному ящику		
	Марка: ОЛТЕСТ+ПВ 45, OLTEST+НС 45		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: демонстрація роботи		
	Після продажу: навчання споживачів, сервісне обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: за рахунок нерозголошення розробницької таємниці			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної

власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.20).

Таблиця 5.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	6000 \$	-	100000\$	6000-8000\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Зв'язок через сайт, через комерційного директора, зустріч на виставках	Постачальником виступає сама фірма	Фірма довгий час співпрацює з ринком СНГ та ЄС	Доставка товару до споживача здійснюється шляхом грузових перевезень

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Недостатньо інформований споживач, неусвідомлений	Сайт, електрона пошта, конференції, виставки	Необхідність метрологічної перевірки трифазних трансформаторів напруги	Донесення можливостей та переваг товару до клієнту	Якщо Вам потрібна вимірювальна техніка – Вам до нас !

Висновки до розділу 5

Даний проект можна реалізувати на фірмі “ОЛТЕСТ”, яка розробляє вимірювальну техніку, контролюючи процес виготовлення зразку безпосередньо.

Динаміка ринку на вимірювальну техніку зростає кожного року, як в Україні так і за кордоном, тому проект є дуже рентабельним.

Серед обраних потенційних клієнтів є метрологічні центри; фірми, що виготовляють трансформатори напруги; організації, що експлуатують трансформатори напруги.

Обрана альтернатива розвитку проекту – стратегія лідерства по витратам, стратегія охоплення ринку – стратегія диференційованого маркетингу, ключовими перевагами товару є надійність, вартість, сервісне обслуговування.

Подальша імплементація проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації вперше вирішене наукове завдання розробки фізико-математичної моделі незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання.

1) З урахуванням симетрії первинної обмотки незаземлюваного трансформатора напруги, яка складається з двох однакових котушок, обґрунтовано модель “середня точка первинної обмотки – екран”.

2) Виконано поділ первинної обмотки на дві симетричні “обмотки” А,Б, та на основі деталізованих рівнянь для витків обмоток ТН та їх груп [8] складена система рівнянь для незаземлюваного трансформатора напруги з урахуванням магнітного розсіювання та прийнято, що часткові індуктивності та взаємні індуктивності цих обмоток є рівними. Відмінність між фазним та лінійним режимом роботи трансформатора напруги показано у вигляді формул для визначення струму навантаження.

3) Вхідні величини для системи рівнянь незаземлюваного ТН з урахуванням магнітного розсіювання знайдено з використанням основоположних формул електротехніки, шляхом експериментальних дослідів та за допомогою комп’ютерного моделювання активної частини ТН у програмних пакетах, що дають змогу вирішувати задачі розподілу електричних та магнітних полів.

4) Виявлено, що режим роботи незаземлюваного ТН не впливає на його значення вторинної напруги, завдяки тому, що сума струмів $\dot{I}_A + \dot{I}_B$ “обмоток” А і Б залишається постійною величиною, хоча окремо \dot{I}_A та \dot{I}_B для фазного та лінійного режимів роботи ТН є різними.

5) Вплив неврахування магнітного розсіювання на стадії проектування трансформаторів напруги, призводить до того, що очікуване значення похибки визначення коефіцієнту масштабного перетворення напруги та кутової похибки в деяких діапазонах відносних напруг може відрізнятись у 2-3 рази.

б) За допомогою корекції витків первинної обмотки незаземлюваного трансформатора напруги досягнуто класу точності $\pm 0,005 \%$ для визначення коефіцієнту масштабного перетворення та $\pm 0,5'$ для визначення кутової похибки у діапазоні відносних напруг від 20 % до 120 %.

Результати роботи є актуальними при розробці незаземлюваних еталонних трансформаторів напруги класом точності $\pm 0,005 \%$ та ще більш точних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. IEC 61869-3:2011. “Instrument transformers – Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers”. – Intr. 2011 – 10. IEC. – 2011. – 35 p.
2. ДСТУ IEC 60044-2:2008. “Вимірювальні трансформатори. Частина трансформатори напруги індуктивні” (IEC 60044-2 :2003 Instrument transformers Part 2: Inductive voltage transformers). – Введ. 2010 – 01 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2010. – 34 с.
3. ДСТУ ГОСТ 23625-2003. «Трансформатори напруги вимірювальні лабораторні. Загальні технічні умови». – Введ. 2003 – 07 – 01. – К.: Держспоживстандарт України. – 2003. – 20 с.
4. Дымков А. М. Трансформаторы напряжения. / А. М. Дымков, В. М. Кибель, Ю. В. Тишенин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1975. – 200 с. – (Трансформаторы; вып. 27).
5. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
6. ГОСТ 8.216 – 2011 “Трансформаторы напряжения. Методика поверки“. – 2013 – 01 – 01. – Межгосударственный стандарт. – 2013. – 28 с.
7. M. Kaczmarek Chosen aspect of the voltage transformer mathematical modeling/ M. Kaczmarek, R. Nowicz, W. Jałmu_ny, R. Chmielecki/ Technical University of Lodz, Department of Applied Electrical Engineering & Instrument Transformers, Łódz, Poland. – 2007. – с. 9-14.
8. Гаран Я. О. Удосконалення високовольтних вимірювальних пристроїв, що використовують автотрансформаторне перетворення напруги : дис. кн. техн. наук : 05.09.13 / Гаран Ярослав Олександрович – Київ, 2018. – 181 с.
9. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів / В. О. Бржезицький, Я. О.

- Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – с.61-63.
10. Бржезицький, В. О. Деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, І. М. Маслюченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1. – с. 32-37.
11. FEMM. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>